**PROPUESTA DE MEJORA DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DEL SECTOR AZUCARERO**

Luz Andrea Chavarriaga M

Nota de Aceptación

Certificamos que el presente Trabajo de Grado Satisface, en alcances y calidad, todos los requisitos que demanda un Trabajo de Grado de Maestría.

Mario Jose Basallo Triana

Sandra Galarza
Jurado

Francisco Muñoz
Jurado

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali, para optar el título de Magister en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Industrial

HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO Ph. D.
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

JUAN CARLOS MARTÍNEZ ARIAS
Director Posgrados de Ingeniería y Ciencias

Santiago de Cali 31/03/2023

## DATOS DEL ESTUDIANTE

**LUZ ANDREA CHAVARRIAGA MALDONADO**

**INGENIO SANCARLOS CASA A6 TULUA VALLE DEL CAUCA**

**lchavarriaga@gmail.com**

**57-2311515-ext 382**

**313 627 85 37**

**INGENIERA INDUSTRIAL**

**INGENIO SANCARLOS S.A**

**JEFE DE GESTIÓN INTEGRAL**

# PROPUESTA DE MEJORA DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DEL SECTOR AZUCARERO

**Presentado por:**

LUZ ANDREA CHAVARRIAGA MALDONADO

**Director:**

MARIO JOSÉ BASALLO TRIANA

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL O INDUSTRIAL**

**2022**

## AGRADECIMIENTOS / DEDICATORIA

A Dios porque de Él provienen la inteligencia y la sabiduría, porque siempre está conmigo, renueva mis fuerzas cada día y su amor y misericordia me sostienen

A mis amores Isabela y Ender porque me imprimen fuerza cada mañana para salir adelante, por su gran amor, insistencia permanente para que terminará, compañía, disposición, paciencia y grandes enseñanzas.

A mi mami linda por su ayuda incansable, sus oraciones y su amor inagotable

A toda mi familia por su alegría y la fuerza que me imprimen

A Cris, sin palabras, sin ti no hubiese sido posible, gracias y mil gracias

A Arley y Kari por su colaboración y gran disposición, infinitas gracias

A Mauro, Pau y a todos los compañeros y amigos que contribuyeron con información y apoyo, Dios los bendiga.

Y al Ingenio Sancarlos, gracias totales han sido pilar fundamental en mi desarrollo profesional.

**TABLA DE CONTENIDO**


1. INTRODUCCIÓN 9
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 11
3 JUSTIFICACIÓN 13
4 OBJETIVOS 15
4.1 General 15
4.2 Específicos 15
5 REVISIÓN DE LA LITERATURA 16
a. Tratamiento de aguas residuales 16
b. Lagunas de estabilización 19
c. Optimización de sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización 20
6 METODOLOGÍA 22
a. Caracterización del sistema lagunar 22
b. Diseño y Solución del Modelo 23
c. Validación de resultados 23
7. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 24
7.1 Fuentes de generación de aguas residuales industriales 24
7.2 Sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI) 25
7.3 Diagnóstico del STARI 32
8 DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAR ELÁREA UTILIZADA DEL SISTEMA LAGUNAR 35
8.1 Descripción del modelo matemático 35
8.2 Desarrollo del modelo matemático 39
10 CONCLUSIONES 62
11 RECOMENDACIONES 64
12 REFERENCIAS 65

## LISTADO DE TABLAS

*Tabla 1. Contaminantes importantes de las aguas residuales* ..... *16*
*Tabla 2. Operaciones y procesos unitarios utilizados para eliminar la mayoría de contaminantes presentes en el agua residual* ..... *17*
*Tabla 3. Batimetría del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales* ..... *28*
*Tabla 4. Resultados de análisis de aguas residuales industriales desde la salida de laguna #6* ..... *32*
*Tabla 5. Resultados de análisis de aguas residuales industriales desde la salida de laguna #3* ..... *33*
*Tabla 6. Parámetros del modelo matemático de optimización del sistema lagunar* ..... *36*
*Tabla 7. Datos de entrada para la Laguna Anaerobia* ..... *40*
*Tabla 8. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna Anaerobia* ..... *41*
*Tabla 9. Datos de entrada para la Laguna Facultativa* ..... *44*
*Tabla 10. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna Facultativa* ..... *45*
*Tabla 11. Datos de entrada para la Laguna de Maduración* ..... *49*
*Tabla 12. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna de Maduración* ..... *50*
*Tabla 13. Cuadro comparativo entre el sistema lagunar actual y el modelo optimizado en m2* ..... *56*
*Tabla 14. Cuadro comparativo entre el sistema lagunar actual y el modelo optimizado* ..... *57*
*Tabla 15. Análisis de sensibilidad con variación porcentual de los parámetros At, DBOem, Nem* ..... *58*
*Tabla 16. Análisis de sensibilidad con variación en la temperatura de los parámetros At, DBOem, Nem* ..... *60*

## LISTADO DE GRÁFICAS

*Gráfica 1. Sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización.* ..... *20*
*Gráfica 2. Conducción de aguas residuales industriales hacia el sistema de tratamiento lagunar* ..... *26*
*Gráfica 3. Esquema de tratamiento de aguas residuales industriales del Ingenio Sancarlos.* *27*
*Gráfica 4. Imagen superior de las Lagunas #1, #2, y #3* ..... *29*
*Gráfica 5. Imagen superior de las Lagunas #4, #5, y #6.* ..... *30*
*Gráfica 6. Imagen perimetral de la laguna #1 y #2* ..... *30*
*Gráfica 7. Imagen perimetral de la laguna #3* ..... *31*
*Gráfica 8. Imagen perimetral de la laguna #4 y #5* ..... *31*
*Gráfica 9. Imagen perimetral de la laguna #6* ..... *31*
*Gráfica 10. Pantallazo del modelo optimizado de Excel* ..... *54*
*Gráfica 11. Solver del modelo a optimizar* ..... *55*
*Gráfica 12. Sensibilidad de los parámetros respecto a la línea base* ..... *59*
*Gráfica 13. Análisis de sensibilidad con variación en la temperatura de los parámetros At, DBOem* ..... *60*

## RESUMEN

En el Ingenio Sancarlos se tratan las aguas residuales industriales mediante un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización. Este sistema tiene como beneficio unos requerimientos mínimos tecnológicos, inversión, operación y mantenimiento (Gomez, 2009; Sah et al., 2012); sin embargo, posee como desventaja que requiere amplias extensiones de tierra para su funcionamiento (Cortés-Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014). Por esta razón, esta investigación desarrolló una herramienta de optimización que permitiera diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales disminuyendo el área total del sistema, para lo cual, en primer lugar, se caracterizó el sistema de tratamiento actual, luego se implementó un modelo matemático de optimización, y posteriormente, se realizó una validación de los resultados. Como resultado de este trabajo, se obtuvo una disminución frente al sistema lagunar actual de un 52% del área total aplicando el modelo de optimización propuesto.



**Palabras clave:** Tratamiento de aguas residuales, lagunas de estabilización, vertimientos, optimización, Ingenio, sostenibilidad.

## ABSTRACT

At the Sancarlos sugar mill, industrial wastewater has treated using a stabilization pond treatment system. This system has as a benefit minimum technological requirements, investment, operation, and maintenance (Gomez, 2009; Sah et al., 2012); however, it has a disadvantage that it requires large extensions of land for its operation (Cortés-Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014). For this reason, this research developed an optimization tool that would allow the design of an industrial wastewater treatment system by reducing the total area of the system, for which, first, the current treatment system has characterized, then a mathematical optimization model has implemented, and subsequently, a validation of the results has carried out. As a result of this work, a reduction of 52% of the total area of the lagoon system was obtained by applying the proposed optimization model.



**Key words:** Wastewater treatment, stabilization ponds, wastewater discharge, optimization, sugar mill, sustainability.

# 1. INTRODUCCIÓN

La industria azucarera colombiana es una actividad productiva de un alto interés social, político y económico nacional, y juega un papel importante en el mercado mundial, ubicándose como decimotercer productor, y en la décima posición de la lista de los principales exportadores de azúcar en el mundo. Se ha convertido en un sector esencial para el crecimiento y la estabilidad social y económica de la zona de influencia, generando significativo impacto en el desarrollo del país (Asocaña, 2020). Los Ingenios enfrentan en forma permanente grandes retos que les exige la implementación de modelos que generen incremento en la productividad, para afrontar los cambios permanentes en los precios internacionales del azúcar, la variabilidad del precio del dólar, los acuerdos comerciales entre gobiernos, los fenómenos climáticos que afectan directamente la producción de caña de azúcar, el cumplimiento del marco normativo ambiental y los retos que implica canalizar esfuerzos para lograr el desarrollo sostenible.

En el proceso productivo, el sector agroindustrial azucarero en el Valle del Cauca, requiere en su ciclo de cultivo y procesamiento grandes volúmenes de agua (10.300 m3/Ha para 230 mil ha cultivadas en el año 2009) (Pérez et al., 2011), generando en su fase de procesamiento un promedio diario de 2.367,4 m3/día de aguas residuales industriales, en todo el sector agroindustrial para el año 2014 (CVC, 2014), con afluentes con características promedios de DQO de 3520 mg O2/L, DBO5 de 1518 mg O2/L, pH 6.5 y SST de 208mg/L. La cantidad de agua residual de los ingenios en la actualidad, no necesariamente guarda relación alguna con la molienda, ya que existen casos de ingenios de alta molienda en donde se ha trabajado en la reducción de vertimientos y por lo tanto han reducido la capacidad de tratamiento, considerando siempre el impacto ambiental negativo del vertimiento de aguas residuales sobre los ecosistemas acuáticos y el deterioro de la oferta de agua (Pérez et al., 2011).

Las aguas residuales industriales, generadas durante el proceso productivo de extracción de la sacarosa a partir de la Caña de Azúcar, se caracterizan por su contenido de materia orgánica susceptible a biodegradación mediante procesos biológicos. Como alternativa de solución en todo el sector para el tratamiento de las aguas residuales industriales, se ha establecido como uso en común, los sistemas de lagunas de estabilización como método de minimización o mitigación del impacto ambiental, permitiendo tratar las aguas industriales antes de su vertimiento a los cuerpos receptores mediante procesos anaerobios, facultativos y aerobios (Cortés-Martínez et al., 2015; Sah et al., 2012). Para el caso del Ingenio objeto de estudio, se cuenta con un tren de tratamiento compuesto por seis lagunas de tratamiento, que se encargan de la remoción de más del 80 % de las cargas contaminantes de DBO5, DQO, SST y grasas y aceites, entre otras.

Los sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización se caracterizan por su fácil operación, mantenimiento y su eficiencia en la remoción de cargas contaminantes, asegurando un cumplimiento con el marco normativo ambiental de calidad de agua residual a un bajo costo (Gomez, 2009; Ramalho, 1996). Sin embargo, estos sistemas presentan como desventaja la ocupación de grandes extensiones de área (Cortés-Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014), haciendo de este un sistema costoso debido al valor de la tierra y los costos de oportunidad de la misma (Ingenio Sancarlos, 2022a) (Procaña, 2020).

Por esta razón, este trabajo pretende diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización que permita disminuir el área total del sistema, mediante un modelo matemático de optimización que permita minimizar el área ocupada por el sistema lagunar, presentando como restricciones la calidad del agua en la fuente, en términos de contenido de materia orgánica. Este diseño propuesto debe asegurar eficiencia tecnológica (Australian Water Recycling, 2015; Oke & Otun, 2001), y cumplimiento legal (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a, 2000b).

Se considera también que, después de casi 30 años de instalación del actual sistema de tratamiento lagunar, el Ingenio debe evaluar los diseños del sistema, dada la variación en sus condiciones actuales frente a las que se estableció en el diseño inicial, mediante la optimización del sistema, que garanticen una menor área y una remoción de cargas contaminantes frente a las características actuales del proceso de extracción de sacarosa.

# 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las aguas residuales derivadas de actividades humanas (vertimientos municipales, industriales, irrigación, ganadería) que no han sido tratadas pueden generar una contaminación severa a las aguas dado que los microorganismos patógenos de las aguas residuales convierten las aguas naturales donde desaguan en fuentes inseguras de suministro para la vida acuática y para el consumo humano, a su vez, la descomposición de la materia orgánica inestable despoja al agua de su oxígeno afectando la vida acuática, de igual forma, los ácidos, aceites, y otros materiales tóxicos acaban con la especies acuáticas y cualquier tipo de vida acuática o afectará la calidad del suministro, y por otra parte, la descomposición de la materia orgánica producirá olores y condiciones desagradables afectando adversamente las propiedades del agua (Valdez & Vázquez, 2003).

El tratamiento de aguas residuales surge como una necesidad de asegurar que los residuos líquidos generados no afecten la salud de los seres humanos y el medio ambiente; y, para cumplir con este propósito, se han desarrollado una gran amplitud de soluciones técnicas de tratamiento que han requerido una aproximación sistemática multidisciplinaria para la reducción de los contaminantes del residuo hídrico (Ramalho, 1996). Dichos tratamientos deben asegurar que los vertimientos cumplen con unos estándares físico químicos y microbiológicos de cumplimiento que a su vez está regulado legalmente y, para el caso colombiano, según Resolución 0631 del 2015, aplica con base en el sector empresarial en que se encuentre la organización (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015b).

Desde el enfoque de la sostenibilidad, se podría decir que el tratamiento más adecuado, especialmente en los países en desarrollo, es el que permite cumplir con los requerimientos de vertimientos microbiológicos, físicos y químicos, al menor costo, con los mínimos requerimientos operacionales y de mantenimiento posibles (Gomez, 2009). El tratamiento de aguas residuales mediante un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización, es uno de los sistemas más recomendados para los países en vía de desarrollo tropicales, por sus bajos niveles de requerimientos tecnológicos, inversión, costos de mantenimiento y operación (Sah et al., 2012). Sin embargo, estos sistemas de tratamiento presentan una desventaja, dado que requieren amplias extensiones de tierra para su tratamiento (Cortés-Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014), lo que representa un alto costo de oportunidad para el caso de organizaciones agrícolas.

Para un ingenio azucarero ubicado en el Valle del Cauca, Colombia, la tierra productiva representa un costo importante puesto que, según Procaña, (2020), el costo de una hectárea de caña para el 2019, puede valer alrededor de COP $108.000.000 /ha.

De igual forma, esta tierra utilizada para el tratamiento de aguas residuales, se podría usar como reservorio de agua para riego, lo cual puede disminuir los costos logísticos de distribución de agua, disminuyendo así los costos de levantamiento del cultivo.

Para el ingenio Sancarlos es estratégico que se pueda disminuir el área total del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (Ingenio Sancarlos, 2020a), sin embargo, para poder realizar este cambio tecnológico, la organización debe presentar ante la autoridad unos diseños que, en primer lugar, avalen la construcción (o modificación) del sistema de tratamiento cumplimiento con las especificaciones técnicas de diseño, y, en segundo, aseguren una eficiencia del sistema de tratamiento (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a, 2000b).

Algunos trabajos de investigación han logrado determinar cuáles son los aspectos tecnológicos de un sistema de tratamiento lagunar que permite asegurar una mayor eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Australian Water Recycling, (2015), concluyó que la luz solar es el factor más importante para la eliminación de microorganismos, que un tiempo de retención lagunar superior a 14 días optimiza el tratamiento; y que, a su vez, la profundidad óptima en las lagunas de maduración está entre 0.8m y 1.2 m, entre otros aspectos. Oke & Otun, (2001), a través, de un modelo matemático, determinó que los costos del sistema de tratamiento están directamente relacionados con la profundidad del sistema lagunar, los afluentes y efluentes de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la tasa de descarga. (Cortés-Martínez et al., 2017; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014; Martínez et al., 2014), han logrado determinar una relación de conexión entre los costos del sistema de tratamiento, el tamaño de las lagunas, el caudal, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los coliformes fecales, con unos tiempos de retención y número de mamparas variables.

Se necesita entonces, determinar cuál es la mejor alternativa tecnológica a aplicar para minimizar el área ocupada por el sistema lagunar mediante un modelo matemático de optimización, teniendo en cuenta restricciones de calidad de agua en efluente, según el marco normativo ambiental nacional.

# 3. JUSTIFICACIÓN

Las aguas residuales industriales, generadas durante el proceso de producción de azúcar y otros subproductos de la caña de azúcar generalmente son tratadas mediante procesos biológicos a través de sistemas lagunares, dichos sistemas requieren una gran extensión de área. Teniendo en cuenta el valor de la tierra, el adecuado uso del suelo, los costos de operación y el compromiso con la sostenibilidad ambiental buscando la minimización de los impactos ambientales generados en el proceso productivo, a través de la realización de este trabajo e implementación del modelo propuesto se pretende dar herramientas a la Alta Dirección y a la Gerencia de la Fábrica que permitan emprender acciones para la disminución del área ocupada actualmente por el sistema lagunar.

Como se presentó en el capítulo anterior, para la gerencia del Ingenio Sancarlos, es estratégico disminuir el área total del sistema de tratamiento para utilizar ese recurso en actividades que permitan, o bien disminuir los costos operativos en levantamiento de cultivo, o generar mayores productividades agrícolas (Ingenio Sancarlos, 2020a). A su vez, disminuyendo el área total del sistema de tratamiento, el Ingenio puede disminuir los costos totales de tratamiento haciendo más eficiente la administración del tratamiento de las aguas residuales industriales.

El sistema actual de tratamiento de aguas residuales industriales en el Ingenio Sancarlos, fue construido en el año 1997 (hace 25 años), está compuesto por 6 lagunas de estabilización (una anaerobia, una facultativa, otra que cumple para facultativa y de maduración, y otras tres de maduración). El área total del sistema lagunar es de 2.71 hectáreas que aseguran, producto del tratamiento, un cumplimiento legal sostenido a lo largo de los años. Sin embargo, el ingenio evalúa la posibilidad de disminuir su sistema de tratamiento, pasando de seis (6) lagunas a tres (3) lagunas, lo cual cumpliría técnica y legalmente según (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000a, 2000b), logrando una reducción de un 45% el área total de las lagunas, es decir 1,2 hectáreas menos de terreno. Este escenario, sólo se podría lograr si en el efluente de la laguna 3 cumple de forma sostenida con los parámetros legales ambientales acorde a la Resolución 0631 del 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015b) que según los datos de los últimos dos años han presentado un cumplimiento variable.

Por otra parte, el tamaño del sistema de tratamiento de aguas residuales impacta directamente los costos de operación, por lo que una reducción en el área disminuiría los costos totales (Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Luévanos Rojas, et al., 2014). Los costos del sistema de tratamiento actual se pueden categorizar en cuatro grupos.

- Costos de operación: Incluye costo de un operario para limpieza de canales, costo de remoción de lodos por medio dragado. Al disminuir el área del sistema de tratamiento, sólo se requeriría dragado para las tres (3) lagunas del sistema propuesto.
- Costos de mantenimiento: Incluye costo de adecuación del sistema lagunar. Al disminuir el área del sistema de tratamiento, disminuirían los costos de mantenimiento totales.
- Costos de monitoreo: A nivel interno, se cuenta con laboratorio interno de análisis de aguas residuales y un equipo medidor de caudal en línea. A nivel externo, con base en requerimientos de la autoridad, se realizan Monitoreos ambientales de cumplimiento con laboratorio externo donde se analizan entre otros el afluente de fábrica, efluente de la laguna3 y efluente final de la laguna 6. Al disminuir las lagunas se eliminaría un punto de muestreo.
- Costos legales: Son los costos relacionados con pago de tasas retributivas y costo de sanciones o multas.

Según (Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Luévanos Rojas, et al., 2014), al reducir el área del sistema lagunar, se reducen igualmente los costos totales del sistema de tratamiento.

En relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2015), el actual sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI) no sólo genera impactos ambientales en materia de vertimientos, también genera otros impactos derivados de su actividad. Según clasificación de ODS por las Naciones Unidas, el STARI del Ingenio Sancarlos impacta los objetivos en relación con lo siguiente:

ODS6: Agua Limpia y Saneamiento. Los consumos hídricos requeridos en el proceso de fabricación de azúcar y derivados generan vertimientos industriales que son tratados en un sistema de estabilización lagunar, para, posteriormente, ser devueltos al caudal del zanjón Burriga, que se conduce al cauce del Río Cauca. Un inadecuado tratamiento lagunar afecta el suministro de calidad de agua y saneamiento respectivo (Gomez, 2009; Ramalho, 1996; Sperling, 2007; Valdez & Vázquez, 2003).

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura. Los procesos productivos para la elaboración de azúcar impactan directamente en la calidad de los vertimientos a tratar. Las ineficiencias operativas del proceso productivo aumentan el caudal de las aguas residuales y aumentan la materia orgánica que deriva al sistema de tratamiento. En términos concretos, la falta de diseño adecuado de equipos o flujos de proceso en procesos, exceso de materiales como agua o materia prima durante la producción azucarera, y unas estructuras inadecuadas de captación hacen que los vertimientos industriales tengan las proporciones que tienen actualmente (Pérez et al., 2011). Lograr eficiencias industriales permitirá disminuir los vertimientos del sistema de tratamiento (Gomez, 2009).

ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres. Como se mencionó anteriormente, el sistema lagunar es un sistema de lagunas de estabilización dispuestas secuencialmente para tratar vertimientos. El sistema actual cuenta con un área de 2.7 hectáreas de terreno, en cuyo espacio se albergan organismos biológicos que son importantes para el tratamiento y para la estructura misma del ecosistema.

La optimización del sistema lagunar en relación con el área total del sistema asegurando un cumplimiento legal en cuanto a la calidad del vertimiento, generará acciones que impacten positivamente el compromiso del Ingenio con la sostenibilidad mundial basada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

# 4. OBJETIVOS

## *4.1 General*

Realizar una propuesta para mejorar el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del sector azucarero integrado por seis lagunas de estabilización, con el fin de minimizar el área utilizada en la actualidad.

## *4.2 Específicos*

1. Identificar las características y las restricciones del sistema lagunar para dar cumplimiento a los parámetros de calidad del agua residual industrial establecidos en lanormatividad ambiental colombiana.

2. Diseñar un modelo matemático para minimizar el área utilizada del sistema lagunar actual.

3. Validar el resultado del modelo matemático desarrollado, con el fin de ver la mejora con respecto al estado actual del sistema lagunar.

# 5. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### *a. Tratamiento de aguas residuales*

El principal objetivo del tratamiento de aguas residuales es permitir que los efluentes humanos e industriales se dispongan sin dañar la salud de la vida humana o dañar el ambiente natural (Gomez, 2009). Por ende, el tratamiento de aguas residuales procura la reducción de contaminantes que al final son vertidos al cauce de un sistema natural acuático. Valdez & Vázquez, (2003), describen los componentes contaminantes más significativos en las aguas residuales, las fuentes más probables y su importancia ambiental (o social), tal y como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Contaminantes importantes de las aguas residuales

| Contaminante | Fuente | Importancia ambiental |
|---|---|---|
| Sólidos suspendidos. | Uso doméstico, desechos industriales y agua infiltrada a la red. | Causa depósitos de lodo y condiciones anaerobias en ecosistemas acuáticos. |
| Compuestos orgánicos biodegradables. | chos domésticos eindustriales. | Causa degradación biológica, que incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores y ocasiona condiciones indeseables. |
| croorganismos patógenos. | Desechos domésticos. | san enfermedadestransmisibles. |
| Nutrientes. | chos domésticos eindustriales. | Pueden causar eutrofización. |
| Compuestos orgánicos refractarios | Desechos industriales. | Pueden causar problemas de sabory olor; pueden ser tóxicos o carcinogénicos. |
| Metales pesados | ıstriales, minería,etc. | Son tóxicos, pueden interferir conel tratamiento y reúso del efluente. |
| Sólidos inorgánicos disueltos. | Debido al uso doméstico o industrial se incrementan con respecto a su nivel en el suministro de agua. | ferir con el reúso delefluente. |

Fuente: Valdez & Vázquez, (2003).

Para realizar una disminución de los contaminantes de las aguas residuales, Ramalho, (1996), plantea una gestión en tres fases:

1. Identificando todos los efluentes de aguas residuales, bien sea de la planta o municipalidad (dependiendo del sistema de tratamiento), y finalmente, determinando los caudales y cargas contaminantes.

2. Revisión de los datos obtenidos en la fase 1 para establecer los objetivos de reducción de contaminación posibles (en la fuente).

3. Evaluación de los ahorros potenciales de inversión y costes de operación de una posible planta de tratamiento separada, si cada una de las corrientes consideradas en la fase 1 y fase 2 se eliminan o reducen. Diseñar una planta de tratamiento (sistema de tratamiento) para conseguir hacer frente a esta reducción de la contaminación.

Un sistema de tratamiento está compuesto por operaciones y procesos diseñados para disminuir ciertos constituyentes de aguas residuales hasta niveles aceptables. En la Tabla 2, Valdez & Vázquez, (2003), describe los sistemas más comunes para la eliminación de contaminantes, y a su vez, describe el tratamiento según su tipo.

Tabla 2. Operaciones y procesos unitarios utilizados para eliminar la mayoría de contaminantes presentes en el agua residual

| Contaminante | | Operación unitaria, proceso unitario, o sistema de tratamiento. |
|---|---|---|
| Sólidos en suspensión | | Sedimentación<br>Desbaste y aireación<br>Variaciones de filtración<br>Flotación<br>Adición de polímeros o reactivos químicos<br>Coagulación sedimentación<br>Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno |
| Materia orgánica biodegradable | | Variaciones de lodos activados<br>Película fija: filtros percoladores<br>Película fija: discos biológicos<br>Variaciones de lagunaje<br>Filtración intermitente de arena<br>Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno<br>Sistemas fisicoquímicos |
| Patógenos | | Cloración<br>Hipocloración<br>Ozonación<br>Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno |
| Nutrientes | Nitrógeno | Variaciones de sistemas de cultivo suspendido con nitrificación y desnitrificación<br>Variaciones de sistemas de película fija con nitrificación y desnitrificación<br>Arrastre de amoniaco (stripping)<br>Intercambio de iones<br>Cloración en el punto crítico |

| | | |
|---|---|---|
| | | Sistemas de tratamiento por evacuación en el terreno |
| | Fósforo | Adición de sales metálicas<br>Coagulación y sedimentación con cal<br>Eliminación biológica y química del fósforo<br>Sistemas de tratamiento por evacuación en el terreno. |
| Materia orgánica refractaria | | Adsorción en carbón<br>Ozonación terciaria<br>Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno |
| Metales pesados | | Precipitación química<br>Intercambio de iones<br>Sistemas de tratamiento por evacuación al terreno |
| Sólidos inorgánicos disueltos | | Intercambio de iones<br>Osmosis inversa<br>Electrodiálisis |

Fuente: Metcalf & Eddy citado por Valdez & Vázquez, (2003)

Por sistema de tratamiento, según (Gomez, 2009; Ramalho, 1996; Valdez & Vázquez, 2003), se tienen diferentes tratamientos (primario, secundario, terciario o avanzado):

- Tratamiento Primario o Preliminar: El objetivo del tratamiento preliminar es remover los sólidos gruesos y otros materiales normalmente frecuentes en las aguas residuales crudas por sedimentación y la eliminación de materiales que flotan mediante el desnatado.
- Tratamiento Secundario: Normalmente realizan una conversión biológica de compuestos orgánicos disueltos y coloidales en biomasa, la cual puede ser removida por sedimentación. El contacto entre microorganismos y compuestos orgánicos se logra suspendiendo la biomasa en el agua residual, o bien haciendo pasar el agua residual sobre una película de biomasa adherida a una superficie sólida.
- Tratamiento Terciario (o avanzado): Considera la remoción adicional de sólidos suspendidos (mediante filtración, u otros) y/o remoción de nutrientes (pueden removerse mediante una combinación de procesos físicos, químicos, y biológicos. En general se usa cuando con el segundo tratamiento no se logra la disminución aceptable de los residuos contaminantes.

Los efluentes de las aguas residuales tratadas deben cumplir, en Colombia, con los requisitos legales establecidos en el Decreto 1076:2015 y con la Resolución 0631 del 2015 del (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015a, 2015b). Los parámetros de control para asegurar cumplimiento con base en la Resolución 0631 de 2015 para una empresa del sector azucarero son: pH, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Sedimentables (SSED), Grasas y Aceites, Compuestos Semivolátiles Fenólicos, Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), Hidrocarburos, Hidrocarburos Totales, Compuesto de Fósforo, Compuesto de Nitrógeno, Iones, Metales y Metaloides, y otros parámetros para análisis y reporte.

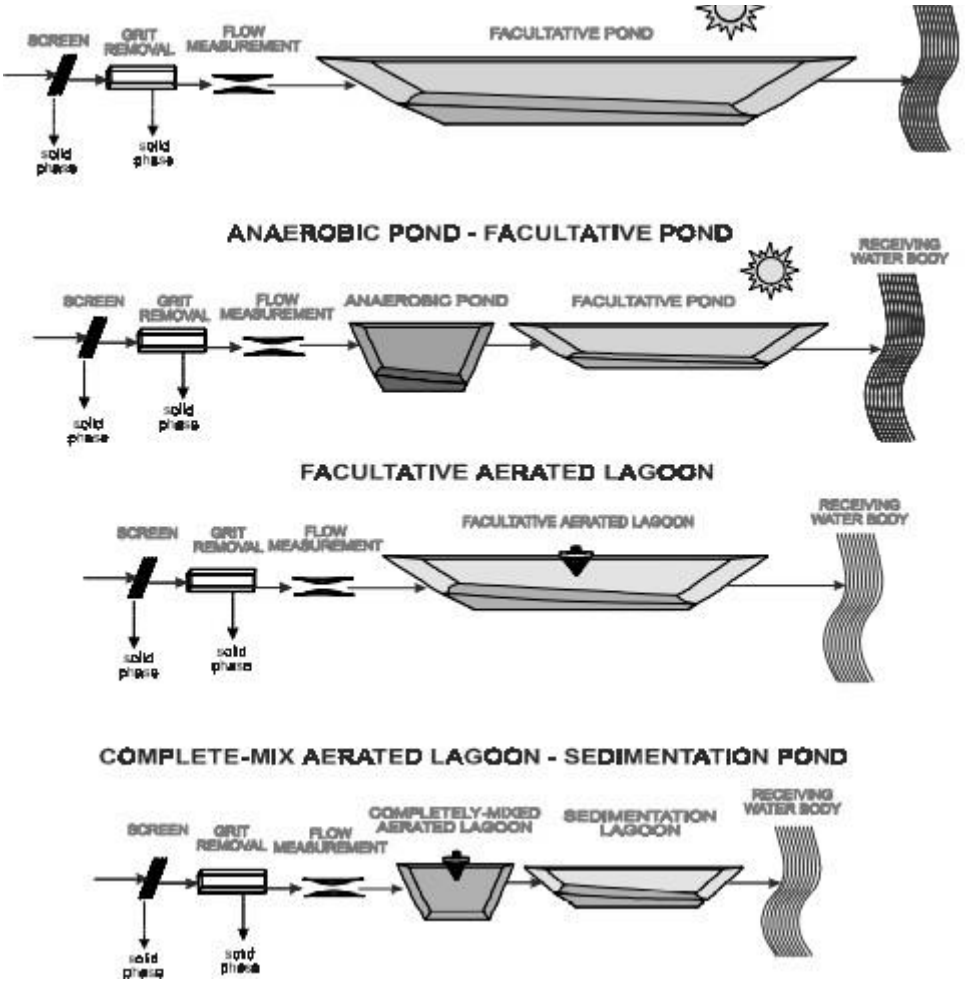
Específicamente la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), según Sperling, (2007), es causada por la Materia Orgánica, y se constituye como el alimento para los microrganismos que se reproducen rápidamente dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales. La DBO se define como la cantidad de oxígeno necesaria para descomponerla, mediante la acción de microrganismos en condiciones aerobias, es causada por su respiración y cesará al agotarse totalmente. Puede ser proteínica, causando una DBO nitrogenada y de carbohidratos que produce una DBO cárbonacea. La DQO, es otra manera de medir la Materia Orgánica indirectamente, a través de la demanda de Oxígeno de los compuestos orgánicos. La DQO de un compuesto es generalmente mayor que la DBO, debido a que muchos compuestos que pueden ser oxidados químicamente, no pueden serlo biológicamente, a través de la biodegradación bacteriana. La relación DQO/DBO determina también la cantidad de materia orgánica no-biodegradable presente en el agua residual (Ho et al., 2017).

### *b. Lagunas de estabilización*

Los sistemas de tratamiento naturales son de los más comunes e implementados alrededor del mundo por sus bajos costos y requerimientos menos sofisticados en la operación y mantenimiento. Entre los sistemas de tratamiento naturales se destacan las lagunas de estabilización, que, según World Bank Report son los sistemas más adecuados para el tratamiento en la agricultura, y se prefieren en los países en vía de desarrollo y tropicales, puesto que tienen unas altas tasas de tratamiento biológico, se cuenta con el recurso de tierra requerido, los costos son razonablemente adecuados y escasea la mano de obra calificada (Gomez, 2009).

Las lagunas de estabilización están diseñadas para tratar las aguas residuales a través de procesos microbiológicos, fotosintéticos, bioquímicos, físico-químicos e hidrodinámicos naturales (Beran & Kargi, 2005; Gomez, 2009; Valdez & Vázquez, 2003). Existen tres tipos principales de lagunas, las cuales son de tipo anaerobio, facultativo y maduración, que a menudo se utilizan en secuencia para conformar un sistema de tratamiento de aguas residuales (Cortés-Martínez et al., 2015; Sah et al., 2012). Según Gomez, (2009), los estanques anaeróbicos tienen una profundidad típica de 2–5 metros y están diseñados para llevar a cabo la eliminación de la carga orgánica con un tiempo de retención relativamente corto de solo unos pocos días, pueden reducir la carga orgánica en un 40 % –70 %, los estanques facultativos, que a menudo reciben agua del estanque anaeróbico, son normalmente menos profundos que los estanques anaeróbicos, con una profundidad típica de entre 1 y 2 (1,5) m, y una remoción entre el 70 y 80% de la carga orgánica recibida. Estos operan en condiciones aeróbicas en las capas superiores y condiciones anaeróbicas cerca del fondo del estanque. Un estanque de maduración que recibe efluentes de un estanque facultativo o un proceso de tratamiento equivalente (como un sistema de tratamiento mecánico) se usa regularmente en la etapa final de una planta de tratamiento de aguas residuales cuando la mayor parte de la materia orgánica ya ha sido eliminada y, por lo tanto, los estanques de maduración sirven principalmente para eliminar organismos patógenos, como bacterias, virus, quistes de protozoos y huevos de helminto (Sperling, 2007). A continuación, La **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** presenta los sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización.

Gráfica 1. Sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización.




Fuente: Sperling, (2007).

### *c. Optimización de sistemas de tratamiento mediante lagunas de estabilización*

Desde la literatura, se han propuesto diversos trabajos para optimizar los sistemas de tratamiento de aguas residuales en busca de eficiencias tecnológicas (Alarcon Chong et al., 2020; Sah et al., 2012). Algunos trabajos como el de Cortés-Martínez et al., (2015), presentan un modelo matemático de optimización utilizando programación no lineal para el diseño de sistemas lagunares integrado por una laguna facultativa y otra de maduración, en función del costo del sistema, que entre otros aspectos cuantifica el costo de mantenimiento y operación del sistema, el costo de oportunidad del espacio utilizado en el sistema lagunar, entre otros.

Otros trabajos como el de Cortés-Martínez et al., (2017) presenta un modelo matemático para la optimización de un sistema lagunar integrado por tres lagunas: anaerobia, facultativa y de maduración. El modelo matemático de optimización tuvo como objetivo la minimización del área ocupada por el sistema lagunar, y presenta como restricciones la calidad del agua en el efluente: demanda bioquímica de oxígeno y el número de coliformes fecales; además, se

restringe la dispersión con el propósito de favorecer el flujo disperso en la laguna facultativa y en la laguna de maduración. Primero se diseñó un sistema de lagunas, luego se aplicó el modelo matemático propuesto. Los resultados arrojaron una disminución del área de 15.16 %. Los dos diseños cumplieron con los límites máximos permisibles de descarga de acuerdo con la normatividad ambiental de calidad del agua residual tratada para el vertido a los cuerpos receptores. Igualmente, trabajos como el de Oke & Otun, (2001), presenta un modelo matemático para la reducción del tamaño del sistema lagunar empleado en las lagunas de estabilización, encontrando que hay una relación lineal entre el tamaño, la profundidad de la DBO del afluente y efluente, tasa de descarga, tasa de reacción constante.

Como se menciona a continuación se han propuesto modelos para predecir la calidad del efluente de las lagunas de estabilización, algunos son los reactores completamente mezclados que se han utilizado con frecuencia para fines de diseño y modelación (Beran & Kargi, 2005). Los modelos matemáticos se desarrollaronpara predecir la calidad del efluente de los sistemas de tratamiento basados en la remoción de la carga orgánica contaminante medida como DQO. Beran & Kargi, (2005) desarrollaron un modelo matemático dinámico cuyo objetivo principal fue predecir la calidad del efluente en sistemas de tratamiento de aguas residuales lagunares facultativos, en donde el modelo consiguió mejorar la calidad del efluente de los sistemas evaluados.

La organización Australian Water Recycling, (2015), adelantó un proyecto de investigación multidisciplinario titulado “Validación de lagunas de tratamiento”, el proyecto abarcó áreas de investigación microbiológica, hidrodinámica, química y ecotoxicológica, donde se emplearon modelos numéricos y estocásticos que evaluaron la eliminación de patógenos, análisis del rendimiento hidrodinámico y los riesgos de los sistemas para la salud.

En la investigación llevada a cabo por Sah et al., (2012), se realizó una comparación de modelos matemáticos para optimización y frente a ellos se recomendó la necesidad de adecuar los modelos de tal forma que incluyera un mayor número de variables.

# 6. METODOLOGÍA

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales, como se presentó anteriormente, son complejos e importantes para el medio ambiente y los seres humanos que habitan allí. Las lagunas de estabilización son uno de los medios más ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales industriales, pero suelen ser ineficientes en tamaño, capacidad, costo, y tratamiento, por lo que algunos autores han presentado propuestas tecnológicas que desde la configuración del diseño del sistema lagunar han encontrado modelamientos que optimizan el sistema. Este trabajo buscó presentar una propuesta de mejora en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del Ingenio Sancarlos con el fin de minimizar el área, alineado a una intención manifiesta de la gerencia para lograr dicho objetivo.

Para lograr este objetivo, este trabajo en primer lugar, se realizó una caracterización del sistema lagunar, identificando las características y las restricciones del sistema de forma que permitan cumplir con los parámetros de calidad de agua establecidos por la normatividad ambiental colombiana, lo cual se detalla más ampliamente en el punto 5.1. Posteriormente, mediante un modelo matemático de optimización, se presentó una propuesta de diseño que plantee una disminución en área al sistema lagunar actual, lo cual se detalla en el punto 5.2. Finalmente, se validó los resultados obtenidos en el modelo matemático mediante un análisis de sensibilidad, lo cual se detalla en el punto 5.3.

### *a. Caracterización del sistema lagunar*

Con el fin de poder analizar el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del Ingenio, se siguió la metodología descrita por (Barbosa Saavedra & Quintero Laborda, 2019), el cual detalla, en una empresa del sector agroindustrial, los afluentes del sistema, el funcionamiento y operatividad del STARI, presenta el cumplimiento legal según los parámetros de calidad de agua, y analiza las desviaciones presentadas.

Para ello, se recolectó información de todas las variables que afectan el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, así:

- Afluentes del sistema: La información de los afluentes del sistema de tratamiento de aguas residuales se obtuvieron con base en el estudio de Modelación del cuerpo de agua receptor y evaluación ambiental del vertimiento (Ingenio Sancarlos, 2020b).
- Descripción del sistema: La información sobre operación del sistema, mantenimiento, y componentes, se obtuvieron con base en información suministrada por el Ingenio Sancarlos.
- Batimetría del sistema: levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, comprende la cartografía de los fondos de cada laguna que compone el sistema (Ingenio Sancarlos, 2020b). Se determinan el área, la profundidad y se describe el fondo y el relieve y todas aquellas anómalas que en ellas puedan existir.
- Análisis de laboratorio externo: Se presentan resultados de análisis de laboratorio de lasaguas residuales entregadas por el sistema lagunar, para los parámetros de calidad de agua con base en la normatividad legal ambiental.

### *b. Diseño y Solución del Modelo*

Con base en la caracterización del sistema y los datos obtenidos por el Ingenio Sancarlos, se empleó un modelo matemático que permitiera optimizar el sistema lagunar asegurando un cumplimiento legal según la normatividad ambiental nacional, y que, a su vez, se alinea a la intención de la gerencia de disminuir el área total del sistema. El estudio que se utilizó para desarrollar la propuesta de diseño del sistema de tratamiento es el descrito por Cortés-Martínez et al., (2017), en cuyo trabajo emplean un modelo matemático de optimización para minimizar el área ocupada, presentando como restricciones la calidad del agua del efluente (demanda bioquímica de oxígeno y número de coliformes fecales).

El modelo de Cortés-Martínez et al., (2017), analiza un sistema lagunar con unas características similares a las que cuenta el Ingenio Sancarlos, puesto que el sistema analizado en el artículo cuenta con una secuencia que inicia por una laguna anaerobia, una facultativa, y una última de maduración, tal como el sistema del Ingenio para las primeras tres primeras lagunas.

El modelo de optimización desarrollado por los autores, es un modelo de programación no lineal, el cual se desarrolla a través de Solver de Excel, mediante el algoritmo de Gradiente Reducido Generalizado (GRG). Para desarrollar el modelo matemático se identificaron las variables de decisión propuestas en el modelo. Se identifican los parámetros del modelo los cuales son datos de entrada para el sistema de tratamiento, posteriormente se desarrollan las ecuaciones descritas en el modelo matemático. Finalmente, con base en la descripción de la función objetivo y las restricciones se obtiene en resultado del modelo optimizado, el cual se compara con los datos actuales del sistema de tratamiento para identificar si hubo o no mejoría con el nuevo diseño propuesto.

### *c. Validación de resultados*

Para validar los resultados del diseño del sistema de tratamiento optimizado según el modelo matemático propuesto por Cortés-Martínez et al., (2017), se realizó un análisis de sensibilidad acorde a lo descrito por los mismos autores, de acuerdo con Saltelli et al (2008), modificando los valores de entrada del modelo en incrementos de ±5%, con el fin de observar los cambios en los resultados con respecto a los valores optimizados.

A su vez, como propuesta de este trabajo de investigación se presenta un análisis de sensibilidad con base en la temperatura promedio del sistema de tratamiento, dado que en la ejecución se observó que es una variable muy sensible al modelo tal como lo concluyen (Cortés-Martínez et al., 2017) en su trabajo.

# 7. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

## *7.1 Fuentes de generación de aguas residuales industriales*

El ingenio Sancarlos, es una empresa agroindustrial dedicada al cultivo y procesamiento de caña para la fabricación y comercialización de azúcar y derivados. Se encuentra ubicado en el kilómetro 7 vía Palomestizo-Riofrío según cámara y comercio.

Tiene una capacidad de suelo agrícola de más de 8.100 hectáreas, suelo industrial de 100 hectáreas aproximadamente, cuenta con una capacidad de molienda de 760.000 Toneladas de caña al año y capacidad de producción de 90.000 toneladas de azúcar al año, dentro de los generadores de energía para la fabricación se tiene una caldera acuotubular de 200.000 l/h a 300 psig de parrilla viajera, que utiliza como combustible principal bagazo, que cuenta con un multiciclón de ocho botellas para control de partículas. y un sistema de evacuación de ceniza vía seca, adicionalmente tiene un turbogenerador para congeneración de energía. Como fuentes de suministro de agua el ingenio Sancarlos tiene una planta de tratamiento con capacidad de producción de 40000 m3-mes para consumo humano e industrial y cuenta con 23 pozos para riego en el campo, (Ingenio Sancarlos, 2022b).

El ingenio cuenta con una concesión de una derivación del río Tuluá (Sub-derivación 2-1 de la acequia Sancarlos) de 854 l/s para el riego de sus cultivos de caña de azúcar, el consumo de agua y proceso de producción de caña de azúcar y mieles. Específicamente para uso industrial se cuenta con un consumo promedio mensual de agua potable y agua industrial de 20.1 l/s (13.2 l/s en el proceso industrial y 6.9 l/s para consumo humano) (Ingenio Sancarlos, 2020c).

En su proceso industrial, se generan residuos líquidos provenientes de diversas fuentes, las cuales después de un tratamiento desembocan al Zanjón Burriga. Las fuentes de generación de aguas residuales industriales se describen a continuación.

Según el estudio de “modelación del cuerpo de agua receptor y evaluación ambiental de vertimiento” del Ingenio Sancarlos, (2020c), las fuentes de generación de aguas residuales son:

- Efluente de molinos: En la molienda se emplea agua para enfriamiento de las turbinas y de los ejes de los molinos, lo que determina el arrastre de trazas de grasas y aceites que, aumentadas con factibles pérdidas de jugo, residuos de bagacillo y arenas, constituyen el denominado efluente de molinos.

- Sobrante de aguas caliente: En los tachos y Evaporadores se emplean grandes cantidades de agua para producir vacío y lograr la ebullición del líquido a menor temperatura.

- Efluente de elaboración: La sección de elaboración conformada por los procesos de clarificación, cristalización y centrifugación contribuye con un alto porcentaje dematería orgánica al vertimiento total del ingenio. El efluente tiene como característicasprincipales la presencia de aguas dulces originadas por derrames de los tanques o fugasen las tuberías y bombas, altas temperaturas ocasionadas por las descargas de los condensados y aguas de sellos de bombas, compresores, etc.

- Efluente de condensados: Actualmente la mayoría de los condensados generados se reutilizan en varios procesos como son: maceración en el proceso de extracción de jugo, lavado de torta de cachaza en el proceso de filtración de lodos, preparación de productos químicos (floculante, cal, etc.), lavado de azúcar en centrifugas, enjuague de equipos para mantenimiento, etc. Los condensados sobrantes se conducen en un 90% hacia las lagunas de tratamiento y el 10% restante hacia el Antiguo Efluente de Fábrica.

- Purgas y descargas de regeneración de resinas de intercambio de la caldera: Descarga de regeneración de resinas de intercambio del sistema de desmineralización, purgas de calderas y efluente de tanque de lodos. Estos desechos contienen sólidos, material inorgánico y pH mayor de 9.0 unidades.

- Efluente de operaciones de lavado de equipos: El lavado de tachos, evaporadores y clarificadores principalmente, produce varios tipos de efluentes con las siguientes características: aguas ricas en azúcar provenientes del enjuague de los equipos antes de proceder a desincrustarlos, aguas alcalinas provenientes del enjuague posterior a la hervida con soda de los evaporadores y aguas residuales de las operaciones de cepilladode los evaporadores ricas en sólidos y carbonatos.

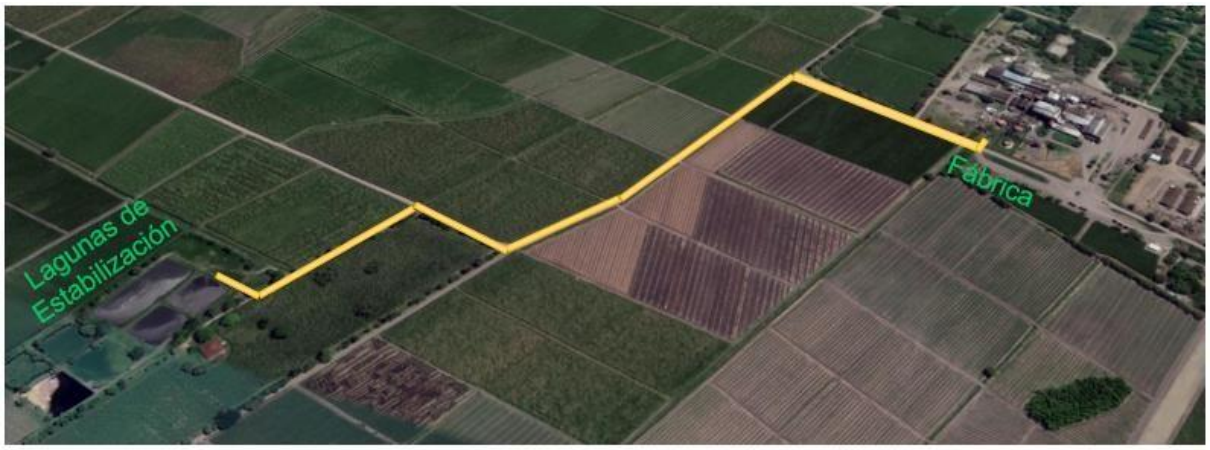
### *7.2 Sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (STARI)*

- ***Funcionamiento del STARI***

El sistema de tratamiento de aguas residuales industriales está constituido por desagües y canales en acero inoxidable con sus respectivas rejillas de protección y concreto en los tramos finales de fábrica hasta el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales (lagunas de estabilización). Los canales y desagües están ubicadas en las diferentes áreas del proceso de fabricación de azúcar y en la salida de fábrica hacia las lagunas de estabilización.

El efluente generado en la fabricación de azúcar en las etapas operación, liquidación y mantenimiento se conducen a través de unos canales abiertos alineados en secuencia con recubrimiento en concreto desde la salida de fábrica, hacia las lagunas de estabilización. Estos canales abiertos en secuencia, tiene una distancia de 1.800 m lineales aproximadamente, que permite el ingreso de las aguas residuales industriales al sistema de tratamiento lagunar.

Gráfica 2. Conducción de aguas residuales industriales hacia el sistema de tratamiento lagunar

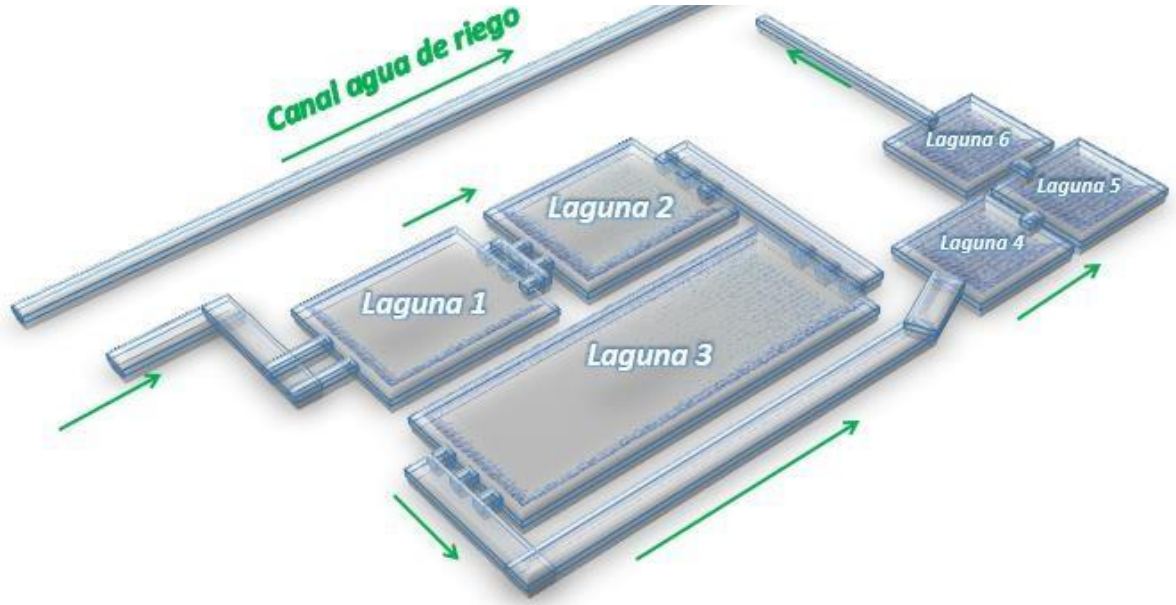



Fuente: Adaptado de Google Earth el día 30 de noviembre del 2022. (https://earth.google.com/web/search/ingenio+sancarlos+tulu%c3%a1/@4.06657975,-76.2699356,935.90885722a,1666.38020657d,35y,69.40827416h,44.97509248t,0.00000001r/data=CigiJgokCUkmfjJ3-zhAEU0mfjJ3-zjAGVj4Wp8uojFAITUqTyIxjVbA)

El sistema de tratamiento lagunar, está compuesto por una laguna anaeróbica (laguna #1), una facultativa (laguna #2), una laguna de maduración que cumplen con condiciones técnicas para ser laguna facultativa (laguna #3) y tres lagunas de maduración (laguna #4, laguna #5, laguna #3). El sistema lagunar opera de forma secuencial, es decir, el tratamiento se realiza de la laguna #1 a la #2, de la laguna #2 a la #3, de la laguna #3 a la #4, de la laguna #4 a la #5, de la laguna #5 a la #6, y de allí se conduce al efluente final, como se puede observar en la *Gráfica* 3. Cada una delas lagunas realiza un tratamiento sobre las aguas residuales del Ingenio, según el objetivo natural de cada una de ellas, primero iniciando por un tratamiento primario con la laguna anaerobia que elimina por medio de la sedimentación la materia orgánica, para posteriormentepasar a la laguna facultativa el cual opera de forma aeróbica en la capa superior y condición anaeróbica en el fondo de la laguna para eliminar materia orgánica, y finalmente una secuenciade 4 lagunas de maduración que elimina los patógenos que pueda presentar las aguas residualesindustriales.

El sistema lagunar está diseñado para tratar las aguas residuales industriales del Ingenio cumpliendo con los parámetros establecidos por la autoridad ambiental nacional acorde a la Resolución 0631 del 2015. La carga de DBO de diseño del sistema es de 1500 kg/día y la de SST de 1000 kg/día, con estos valores la primera laguna anaeróbica trabajaría con una Carga Orgánica Volumétrica promedio igual a 161 gr de DBO/$m^3$-día, las cuales, durante las liquidaciones son superiores.

Gráfica 3. Esquema de tratamiento de aguas residuales industriales del Ingenio Sancarlos




Fuente: Ingenio Sancarlos

- ***Limpieza y mantenimiento del STARI***

Al STARI se le hace labores de mantenimiento y limpieza, tanto en el sistema lagunar, como en los canales de conducción. A las canales que conducen el agua residual, se les hace una remoción de sólido seco con unoperario dedicado exclusivamente para este trabajo.

El mantenimiento del sistema lagunar se realiza el con propósito de retirar la Biomasa generada en el proceso de remoción de materia orgánica y controlar el tiempo de residencia establecido en el diseño. Esta remoción de lodos o Biomasa se realiza mediante un vactor o Draga ubicado en la zona externa a la laguna.

Desde el departamento de Gestión Integral del Ingenio Sancarlos se realizan inspecciones periódicas a los canales de conducción y al sistema lagunar, con el fin de verificar el estado de funcionamiento de cada uno de ellos, y en caso de encontrar desviaciones estas son reportadas a los responsables de proceso para que se tomen las acciones correctivas necesarias.

- ***Dimensiones del STARI***

El sistema lagunar cuenta con las siguientes dimensiones en cada una de sus seis lagunas de estabilización:

- La laguna anaeróbica (laguna #1): tiene 61.32 m en el sentido Norte -Sur, 65.38 m en el sentido Occidente - Oriente y una profundidad útil de 2.24 m.

- La laguna facultativa (laguna #2) tiene 61.2 m en el sentido Norte -Sur, 65.98 m en el sentido Occidente - Oriente y 1.81 m de profundidad.

- La laguna de maduración que cumple técnicamente como laguna facultativa (laguna #3): tiene 59.96 m en el sentido Norte -Sur, 135.4 m en el sentido Occidente - Oriente y una profundidad de 1.38 m.

- La laguna de maduración (laguna #4): tiene dimensiones de 61.93 m en el sentido Norte -Sur, 63.08 m en el sentido Occidente - Oriente y 1.34 de profundidad.

- La laguna de maduración (laguna #5): tiene 64.08 m en el sentido Norte -Sur, 64,11 m en el sentido Occidente - Oriente con profundidad de 1,00 m.

- La laguna de maduración (laguna #6): tiene 73.75 m en el sentido Norte -Sur, 69,57 m en el sentido Occidente - Oriente y profundidad 0.92 m

Estas tres lagunas de maduración (la laguna #4, #5 y #6) ocupan un área de 12.066 m2 como se puede evidenciar en la Tabla 3.

En detalle, el sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del ingenio Sancarlos tiene las siguientes dimensiones y capacidades de retención:

Tabla 3. Batimetría del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales

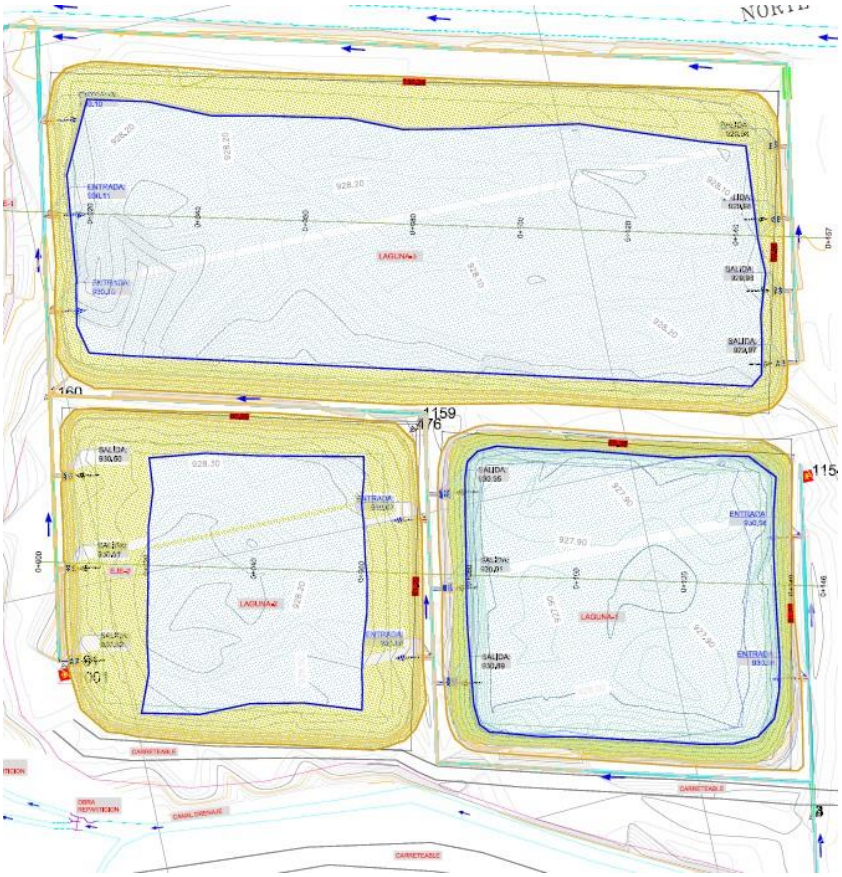
| LAGUNA No. | TIPO DE LAGUNA | DIMENSIONES BORDE DE LAGUNA | | ÁREA PERÍMETRO MOJADO (m2) | COTA LLENADO (m) | ALTURA (m) | CAPACIDAD (m3) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | NORTE -SUR | OCC-ORI | | | | |
| 1 | Anaerobia | 61,32 | 65,38 | 3791,8 | 930,85 | 2,24 | 8492,92 |
| 2 | Facultativa | 61,2 | 65,98 | 3672,88 | 930,5 | 1,81 | 6671,96 |
| 3 | Maduración (cumple como Facultativa) | 59,96 | 135,24 | 7544,77 | 929,97 | 1,38 | 10441,16 |
| 4 | De maduración | 61,93 | 63,08 | 3770,73 | 929,6 | 1,34 | 5065,92 |
| 5 | De maduración | 64,08 | 64,11 | 3871,53 | 929,6 | 1,00 | 3907,94 |
| 6 | De maduración | 73,75 | 69,57 | 4424,23 | 929,6 | 0,92 | 4199,35 |
| **CAPACIDAD TOTAL (m3)** | | | | | | | **30286,33** |

Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Como se puede observar en la Tabla 3, el sistema total de tratamiento de aguas residuales tiene una capacidad total de almacenamiento de aguas residuales de 30.286 m3 (3,028 hectáreas) y a su vez ocupa un área perimetral de 27.076 m2 (2,707 hectáreas). A continuación,se presenta una visualización de las diferentes lagunas, según estudio de batimetría (Ingenio Sancarlos, 2020).

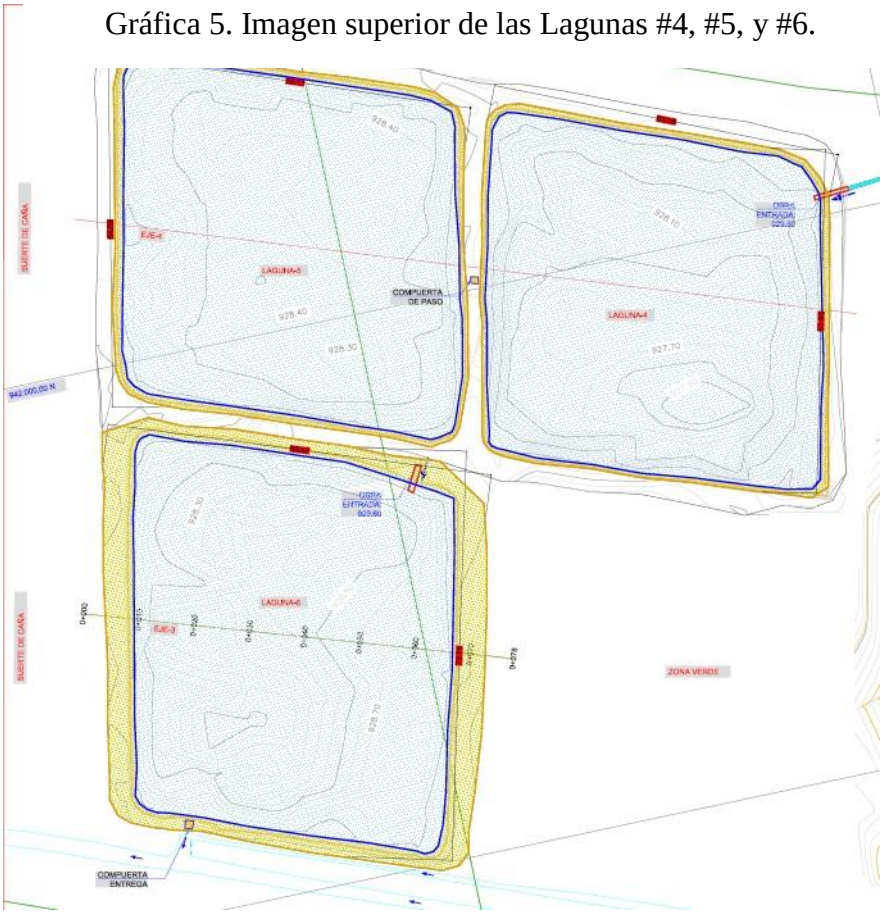
Adicionalmente, la representación gráfica de la parte superior de las lagunas se puede observar en las Gráficas 4 y 5. Asimismo, la imagen perimetral de las mismas se representa en las Gráficas 6, 7, 8 y 9.

Gráfica 4. Imagen superior de las Lagunas #1, #2, y #3



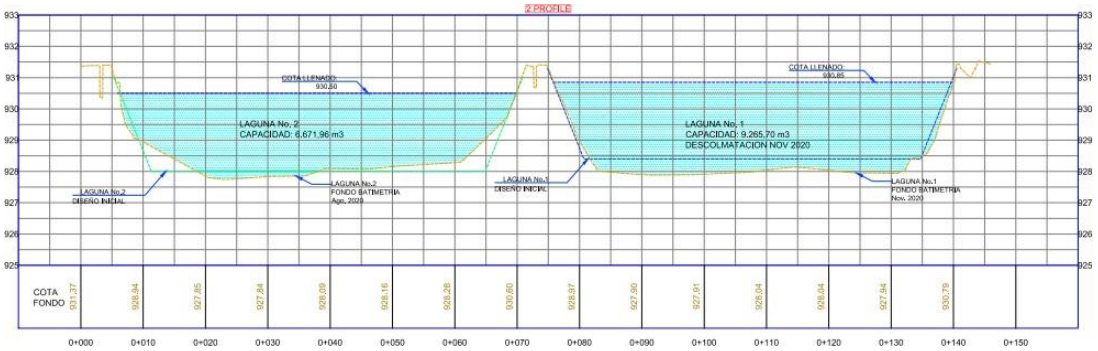

Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Gráfica 5. Imagen superior de las Lagunas #4, #5, y #6.



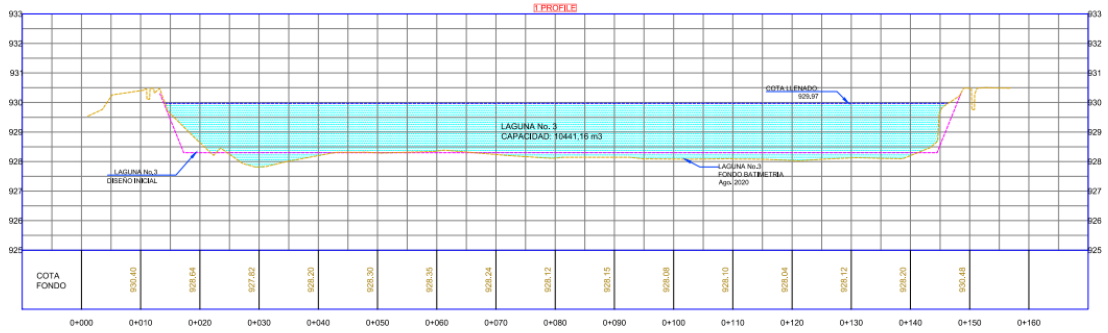

Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Gráfica 6. Imagen perimetral de la laguna #1 y #2



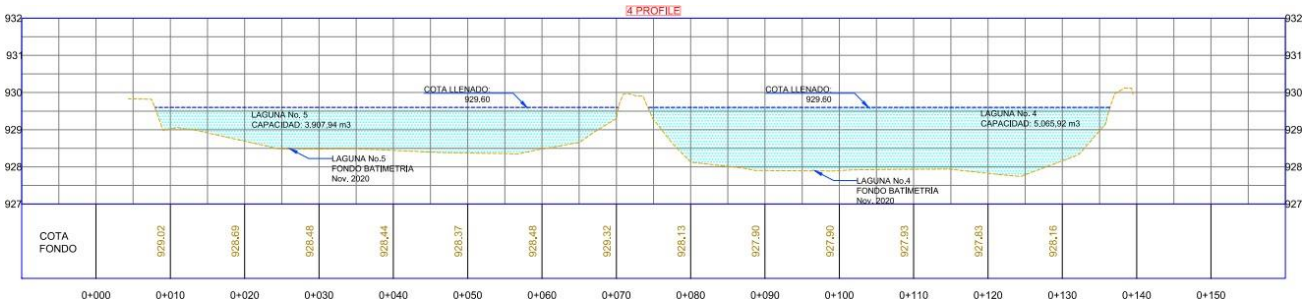

Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Gráfica 7. Imagen perimetral de la laguna #3



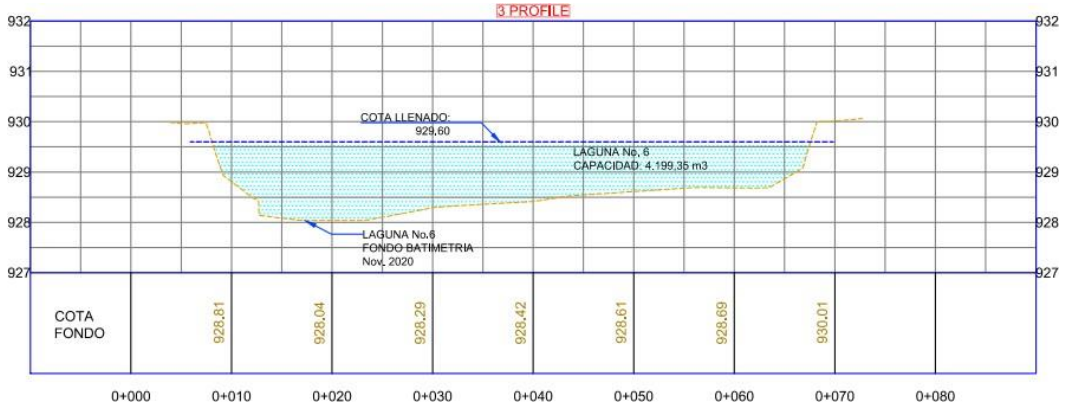

Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Gráfica 8. Imagen perimetral de la laguna #4 y #5




Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

Gráfica 9. Imagen perimetral de la laguna #6




Fuente: Ingenio Sancarlos, (2020)

- ***Monitoreo del STARI***

Para medir el funcionamiento del STARI y la calidad del agua residual tratada, se cuenta con un laboratorio interno de aguas residuales. Se cuenta con equipo de medición en línea de caudal de las aguas residuales industriales y se realiza muestreo y análisis de efluentes para los parámetros: pH, DQO (Demanda Química de Oxígeno), caudal y sólidos suspendidos totales.

A su vez, se realizan monitoreo de calidad de agua con laboratorio externo cada semestre con laboratorios acreditados para las determinaciones analíticas exigidas por la autoridad ambiental en la Resolución 0631 del 2015, con el fin de evaluar la eficiencia del sistema y cumplimiento legal ambiental.

### *7.3 Diagnóstico del STARI*

Para realizar el diagnóstico de cumplimiento normativo ambiental en los parámetros de calidad de agua del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, se utilizaron como fuente de información los análisis realizados por laboratorios externos, dado que estos son los que se presentan a la autoridad ambiental.

A continuación, se presenta la Tabla 4 que resumelos resultados promedio de efluente de laguna #6 (donde finaliza el tratamiento del sistema lagunar) del STARI, y se compara con loslímites permisibles según Resolución 0631 del 2015, desde el año 2017 al 2022.

Tabla 4. Resultados de análisis de aguas residuales industriales desde la salida de laguna #6

| **Parámetros** | **Unidad de Medida** | **Límite según Resolución** | **Año** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** | **2022** |
| | | | **Promedio Salida Laguna 6** | | | | | |
| **pH** | **Unidades de pH** | 6,00 a 9,00 | 6,87 | 5,96 | 7,12 | 7,06 | 7,195 | 8,35 |
| **Demanda Química de Oxígeno (DQO)** | **mg/L O2** | 900 | 513,59 | 512 | 317 | 103,98 | 118 | 224 |
| **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)** | **mg/L O2** | 500 | 250,49 | 131,83 | 122 | 52,3 | 27,4 | 101 |
| **Sólidos Suspendidos Totales (SST)** | **mg/L** | 200 | 78,18 | 42,87 | 36,5 | 22,25 | 43,15 | 14,5 |
| **Sólidos Sedimentables (SEED)** | **mL/L** | 2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | <0,1 |
| **Grasas y aceites** | **mg/L** | 20 | 10,98 | 4,31 | 1,16 | 10,9 | 1,32 | <0,200 |
| **Hidrocarburos Totales (HTP)** | **mg/L** | 10 | 2,84 | 0,52 | 1,1 | 0,25 | 0,271 | <0,2 |
| **Cloruros (Cl)** | **mg/L** | 600 | 26,4 | 36,9 | 9,9 | 13,1 | 12,08 | 7,5 |
| **Sulfatos (SO)** | **mg/L** | 600 | 9,75 | 7,42 | 5 | 7,71 | 5 | 5,59 |
| **Arsénico Total (AS)** | **mg/L** | 0,5 | 0,0025 | 0,0034 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025 | <0,0025 |
| **Cadmio Total (Cd)** | **mg/L** | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00025 | 0,01 | <0,01 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Níquel Total (Ni)** | **mg/L** | 0,5 | 0,001 | 0,2 | 0,004 | 0,01 | 0,134 | <0,002 |
| **Plomo Total (Pb)** | **mg/L** | 0,2 | 0,023 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | <0,01 |

Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por el Ingenio Sancarlos.

Con base en la tabla anterior se puede observar el cumplimiento de todos los límites establecidos por la Resolución 0631 del 2015 por acción del tratamiento de las aguas residuales industriales del sistema lagunar del Ingenio Sancarlos, analizando los resultados promedio de los análisis de laboratorio en las mediciones realizadas en los últimos 6 años.

Dado que la propuesta de la gerencia del Ingenio es pasar de un sistema lagunar de seis (6) lagunas de estabilización (una anaerobia, una facultativa y 4 de maduración) a un sistema lagunar de tres (3) lagunas de estabilización (una anaerobia, una facultativa, una de maduración), a continuación, se presenta en la *Tabla 5* los resultados del efluente de la laguna #3 y se compara con los límites permisibles establecidos por la Resolución 0631 del 2015, por la autoridad ambiental nacional, para el mismo periodo de tiempo (desde el año 2017 hasta el 2021).

Tabla 5. Resultados de análisis de aguas residuales industriales desde la salida de laguna #3

| **Parámetros** | **Medida** | **Límite según Resolución** | **Año** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **2017** | **2018** | **2019** | **2020** | **2021** |
| | | | **Promedio Salida Laguna 3** | | | | |
| **pH** | **Unidades de pH** | 6,00 a 9,00 | 5,7 | 5,91 | 5,44 | 6,78 | 7,08 |
| **Demanda Química de Oxígeno (DQO)** | **mg/L O2** | 900 | 1716 | 2579 | 1607 | 918 | 383 |
| **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)** | **mg/L O2** | 500 | 884 | 1175 | 783 | 429 | 127 |
| **Sólidos Suspendidos Totales (SST)** | **mg/L** | 200 | 272 | 166 | 202 | 59 | 116,5 |
| **Sólidos Sedimentables (SEED)** | **mL/L** | 2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,125 |
| **Grasas y aceites** | **mg/L** | 20 | 11,87 | 13,57 | 5,86 | 6,59 | 14,4 |
| **Hidrocarburos Totales (HTP)** | **mg/L** | 10 | 1,17 | 4,03 | 1,18 | 1,33 | 1,15 |
| **Cloruros (Cl)** | **mg/L** | 600 | 16,5 | 56,5 | 14,8 | 24,3 | 19,9 |
| **Sulfatos (SO)** | **mg/L** | 600 | 7,5 | 14,4 | 5 | 12 | 5 |
| **Arsénico Total (AS)** | **mg/L** | 0,5 | 0,0025 | 0,0026 | 0,0025 | 0,0025 | 0,0025 |
| **Cadmio Total (Cd)** | **mg/L** | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00027 | 0,01 |
| **Níquel Total (Ni)** | **mg/L** | 0,5 | 0,001 | 0,2 | 0,008 | 0,037 | 0,134 |
| **Plomo Total (Pb)** | **mg/L** | 0,2 | 0,024 | 0,1 | 0,1 | 0,12 | 0,1 |

Fuente: Elaboración propia con base en información suministrada por el Ingenio Sancarlos.

Como se puede observar en la tabla anterior, el parámetro de DQO incumple los límites permitidos por la resolución en los años 2017 a 2020 teniendo una desviación promedio entre esos años frente al requisito legal de un 89,4%. Igualmente, el DBO5 se incumple frente al requerimiento legal desde los años 2017 al 2019 con un porcentaje de desviación frente al promedio de esos 4 años de un 89% frente al requisito legal. Finalmente, los sólidos suspendidos totales (SST) presentan incumplimiento en el año 2017 y 2019 teniendo una desviación promedio del 18%. Estos resultados permiten evidenciar que, al considerar un cambio en el diseño de las lagunas pasando de un sistema lagunar de seis (6) lagunas a tres (3) lagunas, el actual sistema presentaría un cumplimiento variable frente a los parámetros de calidad de agua residual según la normatividad ambiental colombiana.

# 8 DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA MINIMIZAR EL ÁREA UTILIZADA DEL SISTEMA LAGUNAR

Dando cumplimiento al objetivo dos del presente trabajo, se desarrolla un modelo matemático que busca minimizar el área ocupada por el sistema lagunar de tratamiento de aguas residuales industriales, con base en el modelo de Cortés-Martínez et al., (2017). Con algunas variantes como la no utilización de mamparas, dado que por las características del sistema lagunar objeto de estudio las mismas no aplicaban

Para la fase de modelamiento se tuvo en cuenta la disposición de la gerencia del ingenio de eliminar del sistema de tratamiento las últimas tres lagunas de maduración, por lo que el sistema analizado bajo el diseño del modelo matemático es el que comprende las primeras tres lagunas, laguna anaerobia (#1), laguna facultativa (#2), y laguna de maduración (#3).

El modelo matemático está compuesto por una función objetivo dada por la suma de las áreas ocupadas por cada laguna, que, a su vez, está restringida por el número de coliformes fecales, el DBO en el afluente, la dispersión de la laguna y el tiempo de retención de cada laguna.

Para la laguna facultativa y de maduración se tomará como variable el tiempo de retención y para la laguna anaerobia será la relación largo y ancho, tomando como base el modelo matemático descrito por Cortés-Martínez et al., (2017). A su vez, para este trabajo, no se tuvo en cuenta el número de mamparas porque esta opción tecnológica no está en el alcance de inversión Ingenio Sancarlos para su sistema de tratamiento.

## *8.1 Descripción del modelo matemático*

- ***Variables de decisión***

Primero se identificaron las variables de decisión necesarias para garantizar la solución óptima del modelo.

Donde:

$X_a =$ Relación entre longitud y anchura de la laguna Anaerobia.

$X_f =$ Relación entre longitud y anchura de la laguna Facultativa.

$X_m =$ Relación entre longitud y anchura de la laguna de maduración.

$O_f =$ Tiempo de retención laguna facultativa.

$O_m =$ Tiempo de retención laguna de maduración.

- ***Parámetros***

Luego de identificar las variables de decisión necesarias para el modelo, se identifican los parámetros o datos de entrada que le dan solución óptima al problema que se quiere resolver. Para describir los parámetros se presenta la Tabla 6 a continuación.

Tabla 6. Parámetros del modelo matemático de optimización del sistema lagunar

| Tipo | Descripción |
|---|---|
| Dimensiones | $A_a =$ Área de la laguna anaerobia $(m^2)$<br>$A_f =$ Área de la laguna facultativa $(m^2)$<br>$A_m =$ Área de la laguna de maduración $(m^2)$<br>$A_t =$ Área Total $(m^2)$<br><br>$a_m =$ Constante dimensional, laguna de maduración<br>$a_f =$ Constante dimensional laguna facultativa<br>$A_{Sup} =$ Área superficial de la laguna $(m^2)$<br>$B_{Sup} =$ Ancho superior de la laguna (m)<br>$B_{Prom} =$ Ancho promedio de la laguna (m)<br><br>$L_{prom} =$ Longitud promedio de la laguna $(m)$<br>$L_{sup} =$ Largo superior de la laguna $(m)$<br><br>$Talud =$ Relación de inclinación de bordos<br>$Va =$ Volumen de la laguna anaerobia $(m^3)$<br>$Vf =$ Volumen de la laguna facultativa $(m^3)$<br>$Vm =$ Volumen de la laguna de maduración $(m^3)$<br><br>$Z_a =$ $Profundidad\ laguna\ anaerobia$ $(m)$<br>$Z_f =$ $Profundidad\ laguna\ facultativa$ $(m)$<br>$Z_m =$ $Profundidad\ laguna\ de$ maduración $(m)$ |
| Calidad del Agua | $DBO_{ea} =$ Concentración de la $DBO_5$ en el efluente de la laguna anaerobia (mg/l)<br><br>$DBO_{ef} =$ Concentración de la $DBO_5$ en el efluente de la laguna facultativa (mg/l)<br><br>$DBO_{em} =$ Concentración de la $DBO_5$ en el efluente de la laguna de maduración (mg/l)<br><br>$DBO_{ia} =$ Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el afluente de la laguna anaerobia (mg/l)<br><br>$DBO_{if} =$ Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el afluente de la laguna facultativa (mg/l )<br><br>$DBO_{im} =$ Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el |

| | |
|---|---|
| | afluente de la laguna de maduración (mg/l )<br><br>$L_{ia}$ = Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el afluente de la laguna anaerobia (mg/l )<br><br>$L_i$ = Concentración de $DBO_5$ $en\ el\ afluente\ de\ la\ laguna\ facultativa$ (mg/l )<br><br>$Nea$ = Coliformes fecales corregidos por evaporación en laguna anaerobia (NMP/100ml)<br><br>$Nef$ = Coliformes fecales corregidos por evaporación en laguna facultativa (NMP/100ml)<br><br>$Nem$ = Coliformes fecales corregidos por evaporación en laguna de maduración (NMP/100ml)<br><br>$\frac{Nf}{No}$ = $N$umero de coliforme en el efluente (NMP/100ml)<br>$Ni$ = Coliformes fecales en el afluente de la laguna (NMP/100ml)<br><br>$Q_{ea}$ = Caudal en el efluente de la laguna anaerobia $(m^3/d)$<br>$Q_{em}$ = Caudal en el efluente de la laguna de maduración $(m^3/d)$<br>$Q_{ia}$ = Caudal en el afluente de la laguna anaerobia $(m^3/d)$<br>$Q_{if}$ = Caudal en el afluente de la laguna facultativa $(m^3/d)$<br>$Q_{im}$ = Caudal en el afluente de la laguna de maduración $(m^3/d)$<br>$Qmed$ = Caudal en el afluente en ($m^3$/d) |
| Tratamiento | $d_f$ = Factor de dispersión de la laguna facultativa adimensional<br>$d_m$ = Factor de dispersión de la laguna de maduración adimensional<br>$e = 2.7182818$<br>$ev$ = Evaporación (mm/d)<br><br>$K_b$ = Coeficiente de reducción bacteriana $(d^{-1})$<br>$Kf$ = Constante de decaimiento a una temperatura en cualquier día con unidades $(d^{-1})$<br>$Kta$ = Constante de decaimiento para la laguna anaerobia<br><br>$O_a$ = Tiempo medio de retencion hidraulico de la laguna anaerobia en dia<br><br>$T$ = Temperatura minima media mensual del aire (°C)<br><br>$C_O$ = Carga organica (kg/d)<br><br>$\lambda v = \ Carga\ organica\ volumetrica\ (\frac{gDBO_5}{m^3 - d})$<br>$\lambda s = \ Carga\ superficial\ de\ dise$ño $(kg/\ ha - d)$ |

Fuente: Elaboración propia con base en Cortés-Martínez et al., (2017)

- ***Función Objetivo***

La función objetivo de esta investigación es minimizar el área total del sistema lagunar del Ingenio Sancarlos, teniendo en cuenta la suma del área comprometida de las lagunas # 1, #2 y #3, cumpliendo con los requerimientos de calidad establecidos por la autoridad ambiental.

Dicha función objetivo viene dada por la siguiente expresión matemática:

$$\text{Minimizar: } A_t = A_a + A_f + A_m \qquad \textit{(Ec. 1)}$$

- ***Restricciones***

Después de tener la función objetivo, esta debe ser restringida por las necesidades de cumplimiento legal establecidas, para que, a su vez, el sistema cumpla con la calidad suficiente en su efluente final.

Para la primera restricción se tiene en cuenta el límite legal expedido en la Resolución 0631 del 2015 en la cual se establece que el máximo efluente de DBO al finalizar el sistema debe ser menor o igual a 500 mg/l. Por lo que la restricción quedaría así:

$$DBO_{em} \leq 500 \qquad \textit{(Ec. 2)}$$

Para la segunda restricción se tiene en cuenta la concentración permitida de coliformes fecales que según el Decreto 1076 del 2015 en el artículo 2.2.3.3.9.5 sobre criterios de calidad para uso agrícola, establece que el límite permitido de re-uso de agua agrícola debe ser menor o igual a 1000 NMP (número más probable). Por lo que la restricción quedaría así:

$$Nem \leq 1000 \qquad \textit{(Ec. 3)}$$

La tercera y cuarta restricción tienen en cuenta el valor mínimo permitido para el factor de dispersión el cual según Cortés-Martínez et al., (2017), con base en Wehner & Wilhelm, (1956); Rojas & León, (1990) debería ser mayor o igual a 0.05, por lo que la restricción quedaría así:

$$d_f \geq 0{,}05 \qquad \textit{(Ec. 4)}$$

$$d_m \geq 0{,}05 \qquad \textit{(Ec. 5)}$$

La quinta restricción identifica el tiempo de retención de las lagunas el cual, según Cortés-Martínez et al., (2017) con base en Arceivala, (1973), en una laguna facultativa debe variar entre 10 a 110 días y en una laguna de maduración debe ser mayor o igual a 5 días y menor o igual a 10 días.

$$10 \leq O_f \leq 110 \qquad \textit{(Ec. 6)}$$

$$5 \leq O_m \leq 10 \qquad \textit{(Ec. 7)}$$

La sexta y última restricción limita el modelo sobre la relación largo y ancho de las lagunas siendo para la laguna facultativa entre 1 y 3 y para la laguna de maduración mayor o igual a 3 (Cortés-Martínez et al., 2017).

$$1 \leq X_f \leq 3 \qquad \textit{(Ec. 8)}$$

$$X_f \geq 3 \qquad \textit{(Ec. 9)}$$

### *8.2 Desarrollo del modelo matemático*

Para desarrollar el modelo matemático de optimización, primero se describen los datos de ingreso al modelo, parámetros, y las ecuaciones correspondientes. Posteriormente, se describe la herramienta de optimización utilizada, y finalmente, se presentan los resultados obtenidos.

- ***Datos de ingreso del modelo matemático***

Para realizar el cálculo del modelo matemático de optimización, primero se resolvieron las ecuaciones del modelo aplicable a cada una de las lagunas de estabilización, según (Cortés-Martínez et al., 2017).

- Laguna Anaerobia (#1)

Los datos de entrada para el modelo matemático fueron identificados para la laguna anaerobia según el afluente de la fábrica en la Tabla 7 que se presenta a continuación:

Tabla 7. Datos de entrada para la Laguna Anaerobia

| Laguna Anaerobia | | |
|---|---|---|
| Parámetro | Valor | Fuente de información |
| $Qia$ | 847 | El dato del caudal de la salida de fábrica que ingresa a la laguna anaerobia, se tomó con base en el promedio del caudal arrojado por el equipo medición en línea del Ingenio Sancarlos. |
| $DBOia$ | 4.654 | El dato del DBOia fue suministrado por el promedio de los datos obtenidos por el laboratorio interno de muestreo a las aguas residuales industriales del afluente de fábrica |
| $T$ | 27 | La temperatura promedio se tomó con base en la temperatura promedio de la región según reporte de weatherspark para el año 2021 (Wether Spark, 2022). |
| $Lia$ | 4654 | Para el Lia se tomó como dato de referencia el DBOia |
| $Ev$ | 4,3 | Para obtener la información del índice de evaporación, se tomó como fuente la información a disposición de Cenicaña, relacionada con información meteorológica para la región y el año de análisis |
| $Za$ | 2,24 | Dato obtenido de la batimetría del Ingenio Sancarlos, (2020b) |
| $Talud$ | 2 | Relación de diseño de las memorias de cálculo del sistema lagunar actual |
| $Nia$ | 1100 | El dato de los coliformes fecales que ingresan a la laguna anaerobia, se tomó con base en información suministrada por el laboratorio interno del Ingenio Sancarlos |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los datos de entrada para la laguna anaerobia se hallaron los datos de los parámetrosdel modelo, aplicando las ecuaciones establecidas por Cortés-Martínez et al., (2017), en la Tabla 8 se presentan las ecuaciones, sus resultados y descripción respectiva.

Tabla 8. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna Anaerobia

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $CO = Q_{ia}(DBO_{ia})/1000 \quad EC.10$ | $CO =$ | 3940,47 | La carga organiza CO es obtenida multiplicando el caudal del afluente en la laguna anaerobia por la concentración de demanda bioquímica de oxigeno del afluente de la misma laguna dividido 1000 |
| $\lambda v = 20\,(T) - 100 \quad EC.11$ | $\lambda v =$ | 440,00 | La carga superficial de diseño es obtenida multiplicando 20 veces la temperatura y restándole 100 |
| $\%DBO_{Removido} = 2T + 20 \quad EC.12$ | $\%DBO\ Remov. =$ | 0,74 | La remoción de la DBO esta dada por 2 veces la temperatura mas 20 |
| $V_a = L_{ia}Q_{ia}/\lambda v \quad EC.13$ | $Va =$ | 8955,60 | El volumen de la laguna esta dado por la concentración de la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de la laguna anaerobia multiplicada por el caudal en el afluente de la misma laguna sobre la carga superficial ya hallada. |
| $A_a = V_a/Z_a \quad EC.14$ | $Aa =$ | 3998,04 | El área de la laguna anaerobia esta dada por el volumen de la laguna sobre su profundidad |
| $O_a = V_a/Q_{ia} \quad EC.15$ | $Oa =$ | 10,58 | El tiempo medio de retención de la laguna anaerobia esta dado por el volumen de la misma sobre el caudal del afluente de la laguna |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $DBO_e = (100 - \%DBO_{Removida})(DBO_{ia})$ $EC.16$ | $DBOe =$ | 1209,99 | La concentración de la $DBO_5$ en el efluente de la laguna esta dada por 100 menos el porcentaje de DBO removida por la concentración de la demanda bioquímica de oxigeno en afluente de la laguna |
| $Q_{ea} = Q_{ia} - 0.001A_a ev$ $EC.17$ | $Q_{ea} =$ | 829,53 | El gasto en el efluente esta dado por la concentración de demanda bioquímica de oxigeno del afluente de la laguna menos 0.001 veces el área de la laguna por el coeficiente de evaporación |
| $Kta.(d^{-1}) = 2.6\ (1.19)^{T-20}$ $EC.18$ | $Kta.(d^{-1}) =$ | 8,79 | La constante de decaimiento para la laguna anaerobia esta dada por 2.6 por (1.19) elevado a la temperatura menos 20 |
| $N_{ea} = \frac{N_{ia}}{1 + KtaO_a)}$ $EC.19$ | $N_{ea} =$ | 11,71 | Los coliformes fecales en el efluente de la laguna están dados por los coliformes fecales del afluente en la laguna sobre 1 mas las constante de decaimiento por el tiempo medio de retención de la laguna anaerobia |
| $DBO_{ea} = (DBO_{ia})(Q_{ia})/(Q_{ea})$ $EC.20$ | $DBO_{ea} =$ | 1235,06 | La DBO corregida por evaporación esta dada por la concentración de la DBO en el afluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de la misma laguna sobre el gasto de demanda en el efluente de la laguna anaerobia. |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $N_e = (N_{ea})(Q_{ia})/Q_{ea}$ $EC.21$ | $N_e =$ | 11,95 | Los coliformes fecales corregidos por evaporación están dados por los coliformes fecales en el efluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de esta laguna sobre la demanda bioquímica de oxigeno en e efluente de la misma. |
| $B_{prom} = \sqrt{\frac{A_a}{X_a}}$ $EC.22$ | $B_{prom} =$ | 63,23 | Para el Dimensionamiento de la laguna, la relación largo y ancho X=2 , siendo el ancho promedio de la laguna la raíz del área de la laguna sobre la relación largo ancho. |
| $L_{prom} = \frac{A_a}{B_{prom}}$ $EC.23$ | $L_{prom} =$ | 63,23 | La longitud promedio esta dada por el área de la laguna anaerobia sobre el ancho promedio |
| $B_{sup} = B_{prom} + (Z_a)(Talud)$ $EC.24$ | $B_{sup} =$ | 67,71 | Ancho superior de la laguna esta dado por el ancho promedio mas la profundidad de la laguna por Talud |
| $L_{sup} = L_{prom} + (Z_a)(Talud)$ $EC.25$ | $L_{sup} =$ | 67,71 | Largo superior de la laguna esta dado por la longitud promedio de la laguna anaerobia mas la profundidad de esta por la constante Talud |
| $A_{Sup} = (B_{sup})(L_{sup})$ $EC.26$ | $A_{Sup} =$ | 4584,65 | El área superficial de la laguna esta dado por el ancho superior por el lago superior de la laguna |

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones descritas anteriormente en la Tabla 8 se desarrollaron con los parámetros de entrada del modelo matemático. De la tabla anterior se obtienen los valores que servirán de afluente para la laguna facultativa (Laguna #2).

- Laguna Facultativa (#2).

Los datos de entrada para el modelo matemático de la laguna facultativa son los datos procedentes del desarrollo de las ecuaciones de la tabla anterior y se detallan a continuación en la Tabla 9::

Tabla 9. Datos de entrada para la Laguna Facultativa

| Laguna Facultativa | | |
|---|---|---|
| Parámetro | Valor | Fuente de información |
| $Qif$ | 829,53 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna anaerobia |
| $DBOif$ | 1.235,06 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna anaerobia |
| $T$ | 27 | La temperatura promedio se tomó con base en la temperatura promedio de la región según reporte de weatherspark para el año 2021 (Wether Spark, 2022) |
| $Li$ | 1.235,06 | Para el Lia se tomó como dato de referencia el DBOif |
| $Qmed$ | 829,53 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna anaerobia |
| $Ev$ | 4,3 | Para obtener la información del índice de evaporación, se tomó como fuente la información a disposición de Cenicaña, relacionada con información meteorológica para la región y el año de análisis |
| $Nmamp - f$ | 0 | No se tienen en cuenta mamparas para el desarrollo del modelo |
| $Nia$ | 11,71 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna anaerobia |
| $Zf$ | 1,81 | Dato obtenido de la batimetría del Ingenio Sancarlos, (2020b) |
| $Talud$ 2:1 | 2 | Relación de diseño de las memorias de cálculo del sistema lagunar actual |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los datos de entrada para la laguna facultativa se hallaron los datos de los parámetros del modelo, aplicando las ecuaciones establecidas por Cortés-Martínez et al., (2017), en la Tabla 10 se presentan las ecuaciones, sus resultados y descripción respectiva.

Tabla 10. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna Facultativa

| Ecuación | | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|---|
| $\lambda s = 250\ (1.085)^{T-20}$ | $EC.27$ | $\lambda v\ =$ | 442,54 | La carga superficial de diseño es obtenida multiplicando 20 veces la temperatura y restándole 100 |
| $A_f = 10 L_i Qmed/\lambda s$ | $EC.28$ | $A_f =$ | 4583,03 | El área de la laguna facultativa se calcula mediante la carga superficial y el caudal en el afluente de la laguna |
| $V_f = (A_f)(Z_f)$ | $EC.29$ | $V_f\ =$ | 8295,28 | El volumen de la laguna esta dado por el área de la laguna facultativa por la profundidad de la misma |
| $O_f = V_f/Q_{if}$ | $EC.30$ | $O_f =$ | 10,00 | El tiempo medio de retención de la laguna facultativa esta dado por el volumen de la misma sobre el caudal del afluente de la laguna |
| $B_{prom-f} = \sqrt{\frac{A_f}{X_f}}$ | $EC.31$ | $B_{prom-f}\ =$ | 67,70 | Para el Dimensionamiento de la laguna, la relación largo y ancho X=3 , siendo el ancho promedio de la laguna la raíz del área de la laguna sobre la relación largo ancho. |
| $L_{prom-f} = \frac{A_f}{B_{prom-f}}$ | $EC.32$ | $L_{prom-f}\ =$ | 67,70 | La longitud promedio esta dada por el área de la laguna facultativa sobre el ancho promedio |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $B_{sup-f} = B_{prom-f} + (Z_f)(Talud)$ $EC.33$ | $B_{sup-f} =$ | 71,32 | Ancho superior de la laguna esta dado por el ancho promedio mas la profundidad de la laguna por la constante Talud |
| $L_{sup-f} = L_{prom-f} + (Z_f)(Talud)$ $EC.34$ | $L_{sup-f} =$ | 71,32 | Largo superior de la laguna esta dado por la longitud promedio de la laguna facultativa mas la profundidad de esta por la constante Talud |
| $A_{Sup-f} = (B_{sup-f})(L_{sup-f})$ $EC.35$ | $A_{Sup-f} =$ | 5086,27 | El área superficial de la laguna esta dado por el ancho superior por el lago superior de la laguna |
| $Q_{ef} = Q_{if} - 0.001 A_f ev$ $EC.36$ | $Q_{ef} =$ | 807,66 | El gasto en el efluente esta dado por la concentración de demanda bioquímica de oxigeno del afluente de la laguna menos 0.001 veces el área de la laguna por el coeficiente de evaporación |
| $X_f = (L_{prom-f})(0.70)(N_{Mamp-f}+1)/((B_{prom-f})/(N_{Mamp-f}+1))$ $EC.37$ | $X_f =$ | 0,70 | Remoción de coliformes fecales. La ecuación considera la relación largo ancho (X). Incluyendo deflectores con una longitud del 70% del largo de la laguna se tiene, teniendo en cuenta que para el caso de estudio las mamparas son cero |
| $d_f = \frac{X_f}{-0.26118+0.25392(X_f)+1.0136\,(X_f)^2}$ $EC.38$ | $d_f =$ | 1,69 | EL coeficiente de dispersión esta dado por la relación largo y ancho |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $K_b = 0{,}841(1.075)^{T-20}$ $EC.39$ | $K_b =$ | 1,3953 | El coeficiente de reducción bacteriana es una constante cinética que depende de la temperatura, la cual se basa en la fórmula de Arrhenius (Marais, 1974; Mara, Pearson, Oragui, Arridge, & Silva, 2001; Banda, 2007): |
| $a_f = \sqrt{1 + 4(K_b O_f d_f)}$ $EC.40$ | $a_f =$ | 9,7745 | La constante de la laguna esta dada por el coeficiente de reducción, el tiempo de retención y el coeficiente de dispersión |
| $\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\, a_f e^{(1-a_f)/2d_f}}{(1+\ a_f)^2} N_i$ $EC.41$ | $\frac{N_f}{N_o} =$ | 0,30 | Los coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa están dados por la constante y los coliformes del afluente de la misma laguna |
| $N_{ef} = (N_e)(Q_{if})/Q_{ef}$ $EC.42$ | $N_{ef} =$ | 0,3 | Los coliformes fecales corregidos por evaporación están dados por los coliformes fecales en el efluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de esta laguna sobre la demanda bioquímica de oxigeno en e efluente de la misma. |
| $K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35-T}}$ $EC.43$ | $K_f =$ | 0,62 | La constante de decaimiento de temperatura, esta dada con base en la temperatura |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $DBO_{ef} = \frac{DBO_{if}}{K_f O_f + 1} \quad EC.44$ | $DBO_{ef} =$ | 170,40 | La concentración de demanda bioquímica de oxigeno en el efluente de la laguna esta dadas por la DBO en el afluente de la laguna sobre la constante de decaimiento de temperatura por el tiempo de retención mas 1 |
| $\%DBO_{Removido-f} = \frac{DBO_{if} - DBO_{ef}}{DBO_{if}} x\ 100 \quad EC.45$ | $\%DBO_{Removido-f} =$ | 86,20 | El porcentaje de eficiencia de remoción de la DBO esta dada por la DBO en el afluente y la DBO en el efluente de la laguna |
| $DBO_{ef\ Corregido} = \frac{DBO_{if} Q_{if}}{Q_{ef}} \quad EC.46$ | $DBO_{ef\ Corregido} =$ | 1268,51 | La DBO corregida por evaporación esta dada por la concentración de la DBO en el afluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de la misma laguna sobre el gasto de demanda en el efluente de la laguna facultativa |

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones descritas anteriormente se desarrollaron con los parámetros de entrada del modelo matemático para la laguna facultativa, que a su vez fueron los datos de salida de la laguna anaerobia. De la tabla anterior se obtienen los valores que servirán de afluente para la laguna de maduración (Laguna #3).

- Laguna Maduración (#3).

Los datos de entrada para el modelo matemático de la laguna de maduración, son los datos obtenidos del desarrollo de las ecuaciones de la tabla anterior y se detallan a continuación en la Tabla 11:

Tabla 11. Datos de entrada para la Laguna de Maduración

| Laguna de Maduración | | |
|---|---|---|
| Parámetro | Valor | Fuente de información |
| $Qim$ | 807,7 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna facultativa |
| $DBOim$ | 170,4 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna facultativa |
| $Ev$ | 4,3 | Para obtener la información del índice de evaporación, se tomó como fuente la información a disposición de Cenicaña, relacionada con información meteorológica para la región y el año de análisis |
| $Nmamp - m$ | 0 | No se tienen en cuenta mamparas para el desarrollo del modelo |
| $Ni$ | 0,3 | Dato de efluente obtenido por desarrollo de ecuaciones par la laguna facultativa |
| $Zm$ | 1,4 | Dato obtenido de la batimetría del Ingenio Sancarlos, (2020b) |
| $Xm$ | 3 | Relación suministrada por Cortés-Martínez et al., (2017) |
| $Talud$ 2:1 | 2 | Relación de diseño de las memorias de cálculo del sistema lagunar actual |

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los datos de entrada para la laguna de maduración se hallaron los datos de los parámetros del modelo, aplicando las ecuaciones establecidas por Cortés-Martínez et al., (2017) , en la Tabla 12 se presentan las ecuaciones, sus resultados y descripción respectiva.

Tabla 12. Desarrollo de ecuaciones para la Laguna de Maduración

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $V_m = (Q_{im})(O_m)$ $EC.47$ | $V_m =$ | 4038,29 | El volumen de la laguna esta dado por el caudal del afluente de la laguna de maduración por el tiempo de retención de la laguna |
| $O_m = V_m/Q_{im}$ $EC.48$ | $O_m =$ | 5,00 | El tiempo medio de retención de la laguna facultativa esta dado por el volumen de la misma sobre el caudal del afluente de la laguna |
| $A_m = \frac{V_m}{Z_m}$ $EC.49$ | $A_m =$ | 2926,30 | El área de la laguna de maduración esta dada por el volumen sobre la profundidad de la laguna |
| $B_{prom-m} = \sqrt{\frac{A_m}{X_m}}$ $EC.50$ | $B_{prom-m} =$ | 31,23 | Para el Dimensionamiento de la laguna, la relación largo y ancho X=3 , siendo el ancho promedio de la laguna la raíz del área de la laguna sobre la relación largo ancho. |
| $L_{prom-m} = \frac{A_m}{B_{prom-m}}$ $EC.51$ | $L_{prom-m}$ | 93,70 | La longitud promedio esta dada por el área de la laguna de maduración sobre el ancho promedio |
| $B_{sup-m} = B_{prom-m} + (Z_m)(Talud)$ $EC.52$ | $B_{sup-m} =$ | 33,99 | Ancho superior de la laguna esta dado por el ancho promedio mas la profundidad de la laguna por la constante Talud |
| $L_{sup-m} = L_{prom-m} + (Z_m)(Talud)$ $EC.53$ | $L_{sup-m} =$ | 96,46 | Largo superior de la laguna esta dado por la longitud promedio de la laguna de maduración mas la profundidad de esta por la constante Talud |

| Ecuación | | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|---|
| $A_{Sup-m} = (B_{sup-m})\,(L_{sup-m})$ | $EC.54$ | $A_{Sup-m} =$ | 3278,71 | El área superficial de la laguna esta dado por el ancho superior por el lago superior de la laguna |
| $Q_{em} = Q_{im} - 0.001 A_m ev$ | $EC.55$ | $Q_{em} =$ | 795,07 | El gasto en el efluente esta dado por la concentración de demanda bioquímica de oxigeno del afluente de la laguna menos 0.001 veces el área de la laguna por el coeficiente de evaporación |
| $X_m = (L_{prom-m})(0.70)(N_{Mamp-m}+1)/((B_{prom-m})/(N_{Mamp-m}+1))$ | $EC.56$ | $X_m =$ | 2,10 | Remoción de coliformes fecales. La ecuación considera la relación largo ancho (X). Incluyendo deflectores con una longitud del 70% del largo de la laguna se tiene, teniendo en cuenta que para el caso de estudio las mamparas son cero |
| $d_m = \frac{X_m}{-0.26118+0.25392(X_m)+1.0136\,(X_m)^2}$ | $EC.57$ | $d_m =$ | 0,44 | EL coeficiente de dispersión esta dado por la relación largo y ancho |
| $K_b = 0{,}841(1.075)^{T-20}$ | $EC.58$ | $K_b =$ | 1,3953 | El coeficiente de reducción bacteriana es una constante cinética que depende de la temperatura, la cual se basa en la fórmula de Arrhenius (Marais, 1974; Mara, Pearson, Oragui, Arridge, & Silva, 2001; Banda, 2007): |
| $a_m = \sqrt{1 + 4(K_b O_f d_f)}$ | $EC.59$ | $a_m =$ | 3,65 | La constante de la laguna esta dada por el coeficiente de reducción, el tiempo de retención y el coeficiente de dispersión |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $\frac{N_m}{N_o} = \frac{4\ a_m e^{(1-\ a_m)/2d_m}}{(1+\ a_m)^2} N_i \qquad EC.60$ | $\frac{N_m}{N_o} =$ | 0,01 | Los coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración están dados por la constante y los coliformes del afluente de la misma laguna |
| $N_{em} = (N_e)(Q_{im})/Q_{em} \qquad EC.61$ | $N_{em} =$ | 0,01 | evaporación están dados por los coliformes fecales en el efluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de esta laguna sobre la demanda bioquímica de oxigeno en e efluente de la misma. |
| $K_m = \frac{K_{m35}}{(1.085)^{35-T}} \qquad EC.62$ | $K_m =$ | 0,62 | La constante de decaimiento de temperatura, esta dada con base en la temperatura |
| $DBO_{em} = \frac{DBO_{im}}{K_m O_m + 1} \qquad EC.63$ | $DBO_{em} =$ | 41,32 | La concentración de demanda bioquímica de oxigeno en el efluente de la laguna esta dadas por la DBO en el afluente de la laguna sobre la constante de decaimiento de temperatura por el tiempo de retención mas 1 |

| Ecuación | Parámetro | Resultado | Descripción de ecuación |
|---|---|---|---|
| $\%DBO_{Removido-m} = \frac{DBO_{im} - DBO_{em}}{DBO_{im}} x\,100 \quad EC.64$ | $\%DBO_{Removido-m} =$ | 75,75 | El porcentaje de eficiencia de remoción de la DBO esta dada por la DBO en el afluente y la DBO en el efluente de la laguna |
| $DBO_{em\,Corregido} = \frac{DBO_{im}Q_{im}}{Q_{em}} \quad EC.65$ | $DBO_{ef\,Corregido} =$ | 173,10 | La DBO corregida por evaporación esta dada por la concentración de la DBO en el afluente de la laguna por la demanda bioquímica de oxigeno en el afluente de la misma laguna sobre el gasto de demanda en el efluente de la laguna facultativa |

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones descritas anteriormente se desarrollaron con los parámetros de entrada del modelo matemático para la laguna de maduración, que a su vez fueron los datos de salida de la laguna facultativa. De este desarrollo de ecuaciones se obtienen los resultados del modelo final.

- ***Solución del modelo matemático***

Con base en la función objetivo, las variables de decisión y los parámetros anteriormente descritos con cada ecuación, y, los datos de entrada, se ingresó el modelo matemático en Excel aplicando el sistema Solver de Excel, que incluye el algoritmo Gradiente Reducido Generalizado (GRG), el cual resuelve problemas de programación lineales o no lineales, y admite expresiones matemáticas de igualdad o desigualdad. Tal como lo menciona Cortés-Martínez et al., (2017) en cita a Muramatsu, (2011), en términos generales, el Solver comienza la optimización con un valor conocido (una solución), luego el algoritmo la mejora hasta donde le permiten las restricciones previamente definidas.

A continuación en la Gráfica 10, se presenta el modelo que fue optimizado con pantallazo del Excel donde se utilizó el Solver.

Gráfica 10. Pantallazo del modelo optimizado de Excel

| VARIABLES | | |
|---|---|---|
| Xf | 1 | Relación largo ancho facultativa |
| Xm | 3 | Relación largo ancho maduración |
| Xa | 1,0 | Relación largo ancho anaerobia |
| Of | 10,0 | Tiempo de retención |
| Om | 5,0 | Tiempo de retención |
| Nmam-F | - | # mamparas |
| Nmam-m | - | # mamparas |

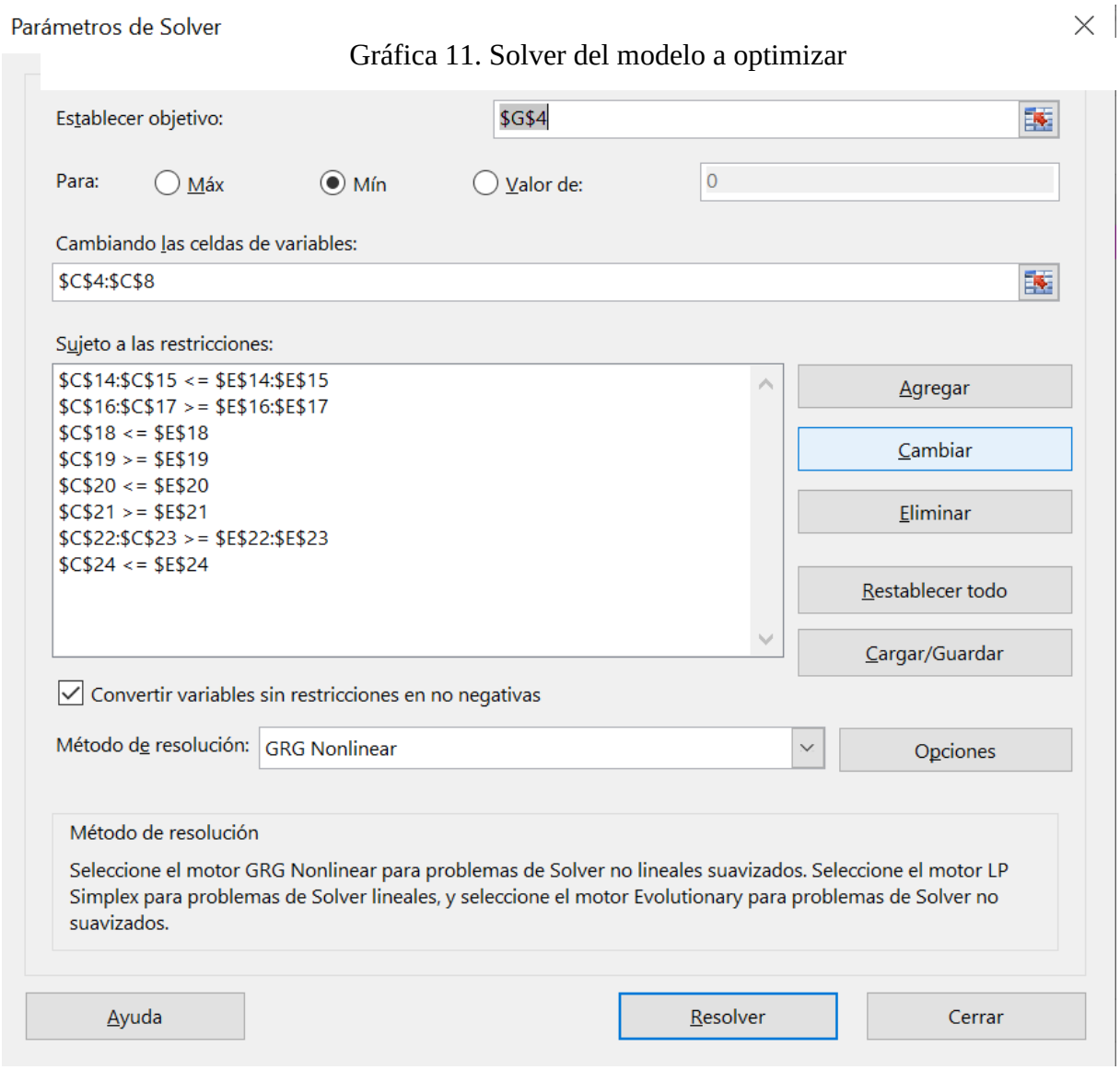
| Función Objetivo | | |
|---|---|---|
| | min | |
| Min Aa + Af + Am | | 12.949,63 |

| RESTRICCIONES | | | | |
|---|---|---|---|---|
| DBOem | 41,32 | <= | ≤ | 500 |
| Ne | 0,01 | <= | | 1000 |
| df | 1,69 | >= | ≥ | 0,05 |
| dm | 0,44 | >= | | 0,05 |
| Of | 10,00 | <= | ≤ | 110 |
| Of | 10,00 | >= | ≥ | 10 |
| Om | 5,00 | <= | ≤ | 10 |
| Om | 5,00 | >= | ≥ | 5 |
| Xm | 3 | >= | ≥ | 3 |
| Xf | 1 | >= | | 1 |
| Xf | 1 | <= | ≤ | 3 |

Fuente: Elaboración propia

Luego de ingresado el modelo y los parámetros al Excel fueron incluidos en el Solver para generar la solución óptima.

Gráfica 11. Solver del modelo a optimizar




Fuente: Elaboración propia.

Resolviendo el modelo matemático como se muestra en la Gráfica 11, se genera unos resultados óptimos que se pueden observar en la sección que se describe a continuación.

- ***Resultados del modelo matemático***

Usando el Solver de Excel en función de la minimización de la función objetivo de área total del sistema lagunar, teniendo en cuenta las restricciones del modelo y las ecuaciones antes descritas con sus respectivos datos de entrada, se obtuvieron los resultados del modelo optimizado.

A continuación, se presenta en la *Tabla 13* un cuadro comparativo entre el área real del sistema lagunar (Ingenio Sancarlos, 2020b) y la propuesta optimizada con base en el modelo matemático.

Tabla 13. Cuadro comparativo entre el sistema lagunar actual y el modelo optimizado en m2

| **ÁREA (m2)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sistema Lagunar** | **Anaerobia** | **Facultativa** | **Maduración** | **Total** |
| Actual (3 lagunas) | 3.792 | 3.673 | 7.545 | 15.009 |
| Modelo Optimizado | 4.585 | 5.086 | 3.279 | 12.950 |
| **% Total de área reducida** | | | | 13,72% |

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la *Tabla 13*, el área total del modelo optimizado reduciría enun 13,72% el área total del sistema de tratamiento comparado, que es el sistema de tratamientode 3 lagunas (las tres primeras), y un 52% frente al sistema completo de tratamiento lagunar con las seis (6) lagunas (1 anaerobia, una facultativa, y cuatro de maduración).

Laguna por laguna, el modelo matemático presenta frente a la batimetría del Ingenio una diferencia, la cual se describe así:

- Laguna Anaerobia: Comparando ambas lagunas, la actual versus la del modelo optimizado, se tiene que la laguna del modelo optimizado es un 20,91% mayor a la laguna real.

- Laguna Facultativa: Comparando ambas lagunas, la laguna facultativa actual versus la del modelo optimizado, se tiene que la laguna del modelo optimizado es un 38,48% mayor a la laguna real.

- Laguna de Maduración: Comparando ambas lagunas de maduración (optimizado versus actual), se tiene que la laguna del modelo optimizado es un 56,54% menor a la laguna real.

En resumen, el modelo presenta una variación en cada una de las áreas del sistema lagunar analizado versus el modelo optimizado, debido, en parte, a una ineficiencia técnica del diseño desarrollado en el sistema lagunar actual en cual se detalla en las conclusiones.

Finalmente, en la Tabla 14 se presenta un comparativo en los tiempos de retención con el sistema lagunar actual, calculado con el volumen actual del sistema, versus el tiempo de retención del modelo optimizado.

Tabla 14. Cuadro comparativo entre el sistema lagunar actual y el modelo optimizado

| **TIEMPO DE RETENCIÓN (días)** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Sistema Lagunar** | **Total** | Anaerobia | Facultativa | Maduración |
| Actual (3 lagunas) | 28 | 7 | 8 | 13 |
| Modelo Optimizado | 26 | 11 | 10 | 5 |

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el tiempo de retención, el modelo optimizado reduce un 8,89% (2 días) el tiempo en que se tratan los vertimientos industriales generados. Comparando laguna por laguna se tiene que: Para la laguna Anaerobia, el modelo optimizado aumenta un 53,29% (4 días) el tiempo de tratamiento, en la laguna facultativa el modelo aumentaría un 28,21% (2 días) el tiempo de tratamiento de aguas residuales, y finalmente, en la laguna de maduración, el modelo optimizado reduciría un 62,69% (8 días) el tiempo de retención para el tratamiento de los residuos líquidos industriales del Ingenio Sancarlos.

# 9 VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO MATEMÁTICO DESARROLLADO

Con el fin de validar los resultados obtenidos en el modelo matemático optimizado, se realizó un análisis de sensibilidad de forma que permitiera analizar la estabilidad del modelo cuando se modifican algunos parámetros, tal como se hizo en el trabajo de Cortés-Martínez et al., (2017).

Para esta investigación se analizó una sensibilidad de ±5 en los parámetros de Área Total (At), Demanda Bioquímica de Oxígeno del efluente del sistema lagunar (DBOem), y Coliformes fecales del efluente del sistema lagunar (Nem). Se tomó como línea base los resultados del modelo optimizado y posteriormente se ajustó la sensibilidad acorde al criterio antes mencionado, obteniendo los resultados presentados a continuación en la Tabla 15:

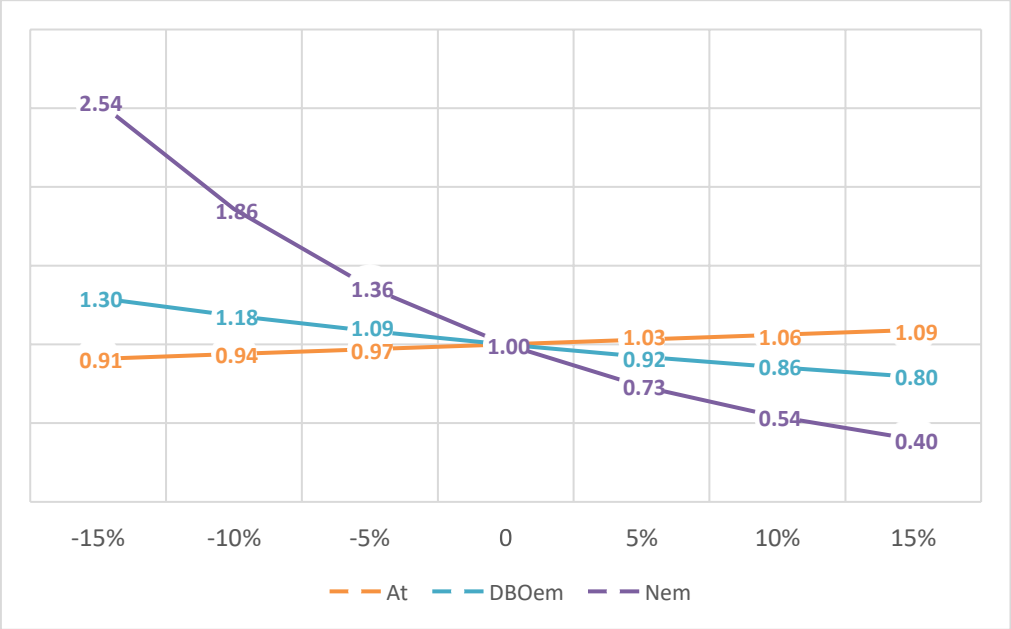
Tabla 15. Análisis de sensibilidad con variación porcentual de los parámetros At, DBOem, Nem

| **ANALISIS DE SENSIBILIDAD** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | -15% | -10% | -5% | 0 | 5% | 10% | 15% |
| At (m2) | 11.760 | 12.156 | 12.553 | 12.950 | 13.346 | 13.743 | 14.139 |
| DBOem (mg/l) | 5<br>4 | 49 | 45 | 41 | 38 | 35 | 33 |
| Nem (NMP) | 0,0270 | 0,0197 | 0,0145 | 0,0106 | 0,0078 | 0,0057 | 0,0042 |

Fuente: Elaboración propia.

Esta sensibilidad en los parámetros permite observar una variabilidad porcentual de los datos como se presenta a continuación en la Gráfica 12:

Gráfica 12. Sensibilidad de los parámetros respecto a la línea base




Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de este análisis de sensibilidad, tal como lo expresa el caso de estudio, según Cortés-Martínez et al., (2017), las coordenadas (0.00, 1.00) indican los valores determinados por el modelo matemático, y, a partir de allí, cuando los parámetros de diseño se incrementan un 0.00 a 15% la demanda bioquímica de oxígeno y coliformes fecales decrecen (0.8 y 0.4 respectivamente), a diferencia del área total que incrementa (1.09). Esto se debe a que modificando estos parámetros se afecta principalmente la variable de tiempo de retención, dado que, a mayor tiempo de retención mayor será el área requerida por el sistema lagunar, y, por el contrario, a menor tiempo de retención, mayor va a ser la concentración de la carga contaminante (DBOem, Nem).

Es importante resaltar que, las variaciones del análisis sensibilidad no afectan el cumplimiento a los parámetros de calidad de vertimiento acorde a la Resolución 0631 de 2015 (500 mg/l para DBO5) y Decreto 1076 de 2015 (1000 NMP para Coliformes fecales por parámetro de reúso de agua en actividades agrícolas), y que, a su vez, con estas variaciones en los parámetros de At, DBOem, y Nem, se cuenta con una holgura frente al cumplimientos de dichos límites legales.

Por otra parte, y siguiendo con recomendación de Cortés-Martínez et al., (2017), se hace una propuesta de análisis de sensibilidad variando la temperatura en 5°C, y se presenta el impacto de esta variación en los mismos parámetros (At, DBOem, Nem), el cual se presenta a continuación en la Tabla 16:

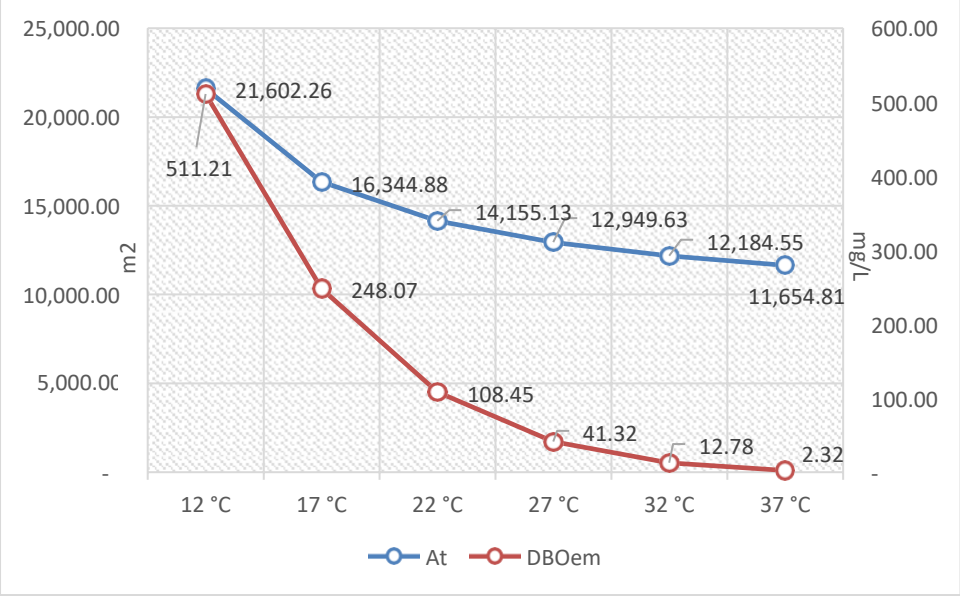
Tabla 16. Análisis de sensibilidad con variación en la temperatura de los parámetros At, DBOem, Nem

| VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| T (°C) | 12 °C | 17 °C | 22 °C | 27 °C | 32 °C | 37 °C |
| At (m2) | 21.602,26 | 16.344,88 | 14.155,13 | 12.949,63 | 12.184,55 | 11.654,81 |
| DBOem (mg/l) | 511,21 | 248,07 | 108,45 | 41,32 | 12,78 | 2,32 |
| Nem (NMP) | 1,37 | 0,38 | 0,07 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis de sensibilidad variando la temperatura, se puede observar gráficamente para los parámetros de Área total (At) y Demanda bioquímica de oxígeno (DBOem) en la Gráfica 13:

Gráfica 13. Análisis de sensibilidad con variación en la temperatura de los parámetros At (m2), DBOem (mg/L)




Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica y tabla anterior, el efecto del cambio de parámetro de la temperatura que para este estudio se presenta en forma teórica, pero que por efectos del cambio climático puede ser una realidad a futuro, tiene gran impacto sobre todo en los parámetros analizados, dado que para el Área Total (At) y Demanda bioquímica de oxígeno (DBOem), en un escenario donde la temperatura promedio sea de 12 °C, el área del sistema de tratamiento total superaría hasta en un 44% al área actual de tratamiento para las tres primeras lagunas

según batimetría del Ingenio (15.009,5m2). Por otra parte, en este escenario, el valor del DBOem superaría el límite legal establecido por la autoridad ambiental para la calidad del vertimiento (500 mg/l para DBO5), por lo que estaría sujeto a incumplimientos y sanciones el Ingenio. El parámetro de coliformes fecales en el efluente no presentarían incumplimiento.

En resumen, la temperatura juega un rol muy importante en el tratamiento de las aguas residuales, debido a que, al disminuir la posibilidad de tratamiento, afecta las variables de relación entre longitud y anchura para cumplir con las restricciones legales, aumentando el área del sistema lagunar. Estos resultados, se alinean a lo descrito por (Australian Water Recycling, 2015; Cortés-Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014; Oke & Otun, 2001), sobre la importancia de la temperatura en el sistema de tratamiento de aguas residuales, y también se alinea a lo descrito por (Gomez, 2009; Ramalho, 1996), sobre la pre eminencia de un sistema de tratamiento lagunar para países tropicales como el nuestro.

Por lo anterior, se puede concluir que el modelo de optimización es estable y confiable, dado que, en el análisis de sensibilidad presentado se refleja un comportamiento coherente con la realidad de un sistema lagunar, y, a su vez, se alinea con el artículo con el cual se basó el modelo (Cortés-Martínez et al., 2017). De igual manera, el análisis de sensibilidad propuesto con variación de la temperatura, se ajusta con lo descrito por diversos autores sobre el funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de lagunas de estabilización.

# 10 CONCLUSIONES

De la investigación realizada en este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En cuanto al cumplimiento normativo del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales del actual sistema lagunar, que lo comprenden seis (6) lagunas de estabilización (una anaerobia, una facultativa, y cuatro de maduración), se evidencia cumplimiento frente a los parámetros de calidad de agua en el vertimiento según la normatividad ambiental nacional. Sin embargo, el actual sistema lagunar sólo para las tres primeras lagunas (una anaerobia, una facultativa y otra de maduración), no presentacumplimiento sostenido a los parámetros de calidad de agua, dado que se presentaron incumplimientos en años anteriores.

- Mediante la propuesta de optimización del área total del sistema de tratamiento de aguasresiduales industriales se obtuvo una disminución frente al área total del sistema actualde un 52% del área, pasando el sistema de seis (6) lagunas de estabilización, a tres (3) lagunas de estabilización, asegurando cumplimiento legal para el sistema lagunarpropuesto. A su vez, con el modelo propuesto, se reduciría dos días (8,89%) el tiempo de retención para el tratamiento de las aguas residuales, según el análisis de las tres lagunas de estabilización comparadas.

- Con la propuesta del modelo de optimización para tres lagunas de estabilización se modifica a su vez el área de cada una de las lagunas, aumentando el área de la laguna anaerobia en un 20,91% frente a la actual, el área de la laguna facultativa en un 38,48%frente al actual, y disminuyendo considerablemente el área de la de laguna de maduración (laguna #3) en un 56,54%, sin requerir las otras tres lagunas de maduraciónpara asegurar cumplimiento. Esto se debe a que, según autores como Sperling, (2007), Gomez, (2009), las lagunas de maduración cumplen un rol de tratamiento principalmente de patógenos (virus, bacterias, otros), y las cargas de coliformes que provienen del afluente de fábrica son bajas en este material debido a que las cargas contaminantes están compuestas, en su mayoría, por materia orgánica producto de la extracción de sacarosa a partir de la caña de azúcar, tal como se describió en la caracterización de afluentes, por lo que no requieren grandes extensiones de tierra parasu tratamiento. Por otra parte, el área de las lagunas anaerobias y facultativas se incrementa dado que, según autores (Gomez, 2009; Ramalho, 1996; Valdez & Vázquez, 2003), el objetivo principal de estas lagunas es tratar la materia orgánica de los vertimientos generados, lo cual constituye la mayor carga contaminante de ingreso al sistema de tratamiento.

- Con base en el análisis de cumplimiento como parte del modelo optimizado del sistemade tratamiento de aguas residuales en el parámetro de Coliformes fecales, se puede concluir que producto del cumplimiento legal con el sistema lagunar propuesto, se podría usar el agua residual industrial para uso agrícola, debido a que cumple el límite permisible según el Decreto 1076 del 2015.

- Con base en el análisis de sensibilidad realizado, se pudo concluir en primer lugar que el modelo matemático optimizado es estable a las variaciones de los parámetros y se comporta según presenta el autor del modelo (Cortés-Martínez et al., 2017) y según la sensibilidad de las variables esperadas (Australian Water Recycling, 2015; Cortés- Martínez et al., 2016; Cortés-Martínez, Treviño-Cansino, Alcorta-García, et al., 2014; Oke & Otun, 2001). En segundo lugar, se puede concluir la importancia del parámetro de la temperatura promedio en el tratamiento de aguas residuales por un sistema lagunardado que unos cambios dramáticos en las temperaturas del ambiente (15°C menos de los actuales) podrían volver inviable el sistema lagunar como tecnología de tratamientode aguas residuales industriales.

# 11 RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones y para la gerencia del Ingenio Sancarlos, y la comunidad académica, se presentan las siguientes recomendaciones:

- Frente a los resultados del modelo de optimización propuesto, se recomienda a la gerencia del Ingenio Sancarlos destinar los recursos y directrices necesarias para implementar las adecuaciones propuestas al diseño del sistema lagunar para todas las tres lagunas de estabilización, modificando las áreas actuales por las áreas recomendadas y sacando de línea a las otras tres lagunas, permitiendo así, asegurar cumplimiento legal y disminuyendo el área total del sistema de tratamiento. Este cambioen la tecnología del sistema de tratamiento deberá ser reportado a la autoridad ambientalpara su conocimiento y control pertinente.

- Se recomienda a la gerencia del Ingenio Sancarlos solicitar a la autoridad ambiental permiso para utilizar el agua de los efluentes del sistema lagunar para uso agrícola, dadoque como se evidenció en la propuesta de optimización, se cumpliría con los límites permisible en coliformes fecales como criterio de calidad para rehúso del agua.

- Se recomienda a la gerencia del Ingenio Sancarlos seguir trabajando en el control de procesos de forma que pueda estabilizar las cargas contaminantes a lo largo del tiempo, y reduzca la materia orgánica generada. A su vez, se recomienda al laboratorio de aguas residuales industriales del Ingenio establecer un plan de muestreo que incluya indicadores de calidad de agua para rehúso en actividades agrícolas.

- En caso de que la organización logre disminuir la carga orgánica en los vertimientos industriales generados, se recomienda implementar nuevamente el modelo matemáticopara determinar si seguir disminuyendo el área total del sistema lagunar de tratamiento,y considerar en esta implementación, un análisis en disminución de costos tal como lo proponen autores como Oke & Otun, (2001) o (Cortés-Martínez et al., 2015).

# 12 REFERENCIAS


Alarcon Chong, E. B., Guevara Rimachin, K. P., Llatas Rafael, J. P., & Tapia Muños, J. C. (2020). Alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Una revisión sistemática de la literatura. *Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo*, 1–21.

Asocaña. (2020). *Somos azucar y mucho más - Informe Anual 2019 - 2020*. 96.

Australian Water Recycling. (2015). *Validation of maturation ponds in order to enhance safe and economical water recycling* (Issue October). Griffith University.

Barbosa Saavedra, A. F., & Quintero Laborda, J. C. (2019). *Propuesta de optimización del sistema de tratamiento de aguas residuales (STAR) de una empresa del sector panelero en el Valle del Cauca*. Universidad Central del Valle del Cauca (UCEVA).

Beran, B., & Kargi, F. (2005). A dynamic mathematical model for wastewater stabilization ponds. *Ecological Modelling*, *181*(August 2003), 39–57. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.06.022

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Alcorta-García, M. A., Sáenz-López, A., & Gonzáles-Barrios, J. L. (2014). Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *6*, 1–14. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000200006

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Alcorta-García, M. A., Sáenz-López, A., & González-Barrios, J. L. (2015). Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *6*(2), 85–100. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000200006

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Espinoza-Fraire, A. T., Sáenz-López, A., Alcorta-García, M. A., González-Barrios, J. L., Martínez-Rojas, R., & De-La-cruz-acosta, F. J. (2017). Optimización en el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales integrado por tres lagunas de estabilización. *Tecnologia y Ciencias Del Agua*, *8*(4), 139–155. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-09

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Luévanos Rojas, A., Luévanos Rojas, R., & Uranga Sifuentes, A. C. (2014). Objective function in the design of the facultative lagoon (case study). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *5*(3), 433–447.

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Sáenz-López, A., González-Barrios, J. L., & De La Cruz-Acosta, F. J. (2016). Mathematical modeling and optimization in the design of a maturation pond. *Journal of Applied Research and Technology*, *14*(2), 93–100. https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.04.004

Gomez, K. (2009). *Waste water management*. Oxford Book Company.

Ho, L. T., Echelpoel, W. Van, & Goethals, P. L. M. (2017). Design of waste stabilization

pond systems : A review. *Water Research*, *123*, 236–248.

Ingenio Sancarlos. (2020a). *Acta de Revisión Gerencial 6/3/2020* (RG-001-10).

Ingenio Sancarlos. (2020b). *Batimetría del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*.

Ingenio Sancarlos. (2020c). *Modelación del cuerpo de agua receptor y evaluación ambiental del vertimiento Ingenio Sancarlos* (Issue 5). DE-PA18-002

Ingenio Sancarlos. (2022a). *Acta de Revisión Gerencial 8/2/2022* (RG-001-14).

Ingenio Sancarlos. (2022b). *Manual de gestión integral* (28). M-PG01-001

Martínez, F. C., Cansino, A. T., García, M. A. A., Kalashnikov, V., & Rojas, R. L. (2014). Mathematical analysis for the optimization of a design in a facultative pond: Indicator organism and organic matter. *Mathematical Problems in Engineering*, *2014*(May), 12. https://doi.org/10.1155/2014/652509

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). *Decreto 1076 de 2015* (pp. 1–653). Republica de Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). *Resolución 0631 del 2015* (pp. 1–62). Republica de Colombia.

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000a). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000. In *Título E* (p. 178).

Ministerio de Desarrollo Económico. (2000b). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS - 2000* (p. 114).

Naciones Unidas. (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Oke, I. A., & Otun, J. (2001). *Mathematical Analysis of Economic Sizing of Stabilization Ponds. (no citar)*. *9*.

Pérez, M. A., Peña, M. R., & Alvarez, P. (2011). Agro-industria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de agrocombustibles en colombia. *Ambiente e Sociedade*, *14*(2), 153–178. https://doi.org/10.1590/S1414-753X2011000200011

Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales. In *Bernardo-Servin-Massieu*. Editorial Reverté S.A.

Sah, L., Rousseau, D. P. L., & Hooijmans, C. M. (2012). Numerical modelling of waste stabilization ponds: Where do we stand? *Water, Air, and Soil Pollution*, *223*(6), 3155–3171. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1098-4

Sperling, M. von. (2007). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publisher.

Valdez, E. C., & Vázquez, A. (2003). Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. In *Fundación ICA*. Fundación ICA, A.C.

Wether Spark. (2022). *Datos históricos meteorológicos de 2021 en Tuluá Colombia*.

https://es.weatherspark.com/h/y/21520/2021/Datos-históricos-meteorológicos-de-2021-en-Tuluá-Colombia#Figures-Temperature