

**ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE REMOCIÓN (K), EN LAGUNAS FACULTATIVAS  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE  
MADRID, CUNDINAMARCA**

**EDGAR ORJUELA MONTOYA  
MAURICIO CHARRY AGUDELO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C.  
2019**

**ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE REMOCIÓN (K), EN LAGUNAS FACULTATIVAS  
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE  
MADRID CUNDINAMARCA**

**EDGAR ORJUELA MONTOYA  
MAURICIO CHARRY AGUDELO**

**Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos**

**DIRECTOR  
FELIPE SANTAMARÍA ALZATE  
Ing. Ambiental- Magíster en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS  
BOGOTÁ D.C.**

**2019**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C. 15 de junio de 2019

## **DEDICATORIA**

*A Dios* por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr los objetivos propuestos.

*A nuestros padres*

Por haber sido los pilares fundamentales en la persona que somos hoy, cada acción que realizamos, se da gracias a cada valor enseñado, cada error corregido, cada momento de motivación constante y al enseñarnos la perseverancia como única salida a cada obstáculo. Gracias por su incondicional apoyo, conservado a través del tiempo.

*A nuestros docentes*

Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales, para la elaboración de esta tesis y nuestra formación profesional y personal.

## **AGRADECIMIENTOS**

El agradecimiento más profundo a la Universidad Católica de Colombia, que nos brindó un espacio académico en el cual desarrollar cada una de nuestras habilidades, y que no sólo nos formó como especialistas en recursos hídricos, sino que también personas.

Al Ingeniero Ambiental- Magíster en Ingeniería Civil Felipe Santamaría Alzate, director del presente estudio, por la paciencia y apoyo en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Madrid Cundinamarca, por el apoyo brindado.

**CONTENIDO**

	Pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN .....	15
1. GENERALIDADES TRABAJO DE GRADO.....	16
1.1 Línea de investigación.....	16
1.2 Planteamiento del problema .....	16
1.2.1 Antecedentes del problema .....	16
1.3 Antecedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	17
1.3.1 Pregunta de investigación.....	19
1.4 Justificación.....	19
1.5 Objetivos .....	20
1.5.1 Objetivo general .....	20
1.5.2 Objetivos específicos.....	20
2. MARCO DE REFERENCIA.....	21
2.1 Marco teórico .....	21
2.1.1 Tratamiento de aguas residuales domésticas por medio de lagunas de estabilización 22	
2.1.2 Clasificación de las lagunas .....	22
2.1.3 Ecología de las lagunas anaerobias .....	24
2.1.4 Lagunas aeróbicas .....	25
2.1.5 Factores de influencia.....	26
2.1.6 Modelos matemáticos.....	30
2.1.6.1 <i>Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden</i> .....	30
2.1.6.2 <i>Modelo de flujo arbitrario</i> .....	31
2.1.6.3 <i>Modelo de flujo pistón</i> .....	31
2.1.7 Modelos semiempíricos.....	32
2.1.8 Correlación sudafricana.....	32
2.1.9 Modelo de mezcla completa para lagunas anaerobias .....	33
2.1.10 Modelo de Vincent .....	33
2.1.11 Modelo empírico en función de la temperatura .....	33

2.1.12	Diseño basado en la carga volumétrica .....	33
2.2	Marco legal.....	34
2.3	Estado del arte .....	37
2.3.1	Verificación de dos coeficientes de diseño para lagunas de estabilización .....	37
2.3.2	Rendimiento hidráulico de un estanque de estabilización de aguas residuales profundas.....	37
2.3.3	Evaluación del coeficiente de reacción (k) para sistemas de lagunas facultativas a gran escala.....	38
2.3.4	Determinación de los coeficientes de reacción del crecimiento biológico y decaimiento endógeno en las lagunas de estabilización del municipio de Zipaquirá.....	38
2.3.5	Determinación de los coeficientes cinéticos para el diseño de lagunas de estabilización en la industria alimentaria, caso Productos Ramo S.A.....	39
3.	METODOLOGÍA .....	40
3.1	Fases del trabajo de grado .....	40
3.2	Instrumentos o herramientas utilizadas .....	41
3.2.1	Diseño experimental.....	41
3.2.2	VARIABLES.....	41
3.2.3	Diseño del muestreo .....	41
3.2.3.1	<i>Caracterización fisicoquímica .....</i>	<i>41</i>
3.2.3.2	<i>Ubicación de las estaciones del muestreo.....</i>	<i>42</i>
3.2.4	Procesamiento y análisis de la información .....	42
4.	RESULTADOS.....	44
4.1	Toma de muestras.....	44
4.2	Parámetros de análisis de carga orgánica para laguna anaerobia .....	45
4.3	Método teórico de Vincent.....	48
4.4	Parámetros de análisis de carga orgánica para laguna facultativa.....	50
4.5	Métodos teóricos .....	53
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	54
6.	CONCLUSIONES .....	59
7.	RECOMENDACIONES .....	61
	REFERENCIAS .....	63

### Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ubicación PTAR-Madrid I .....	18
Figura 2. Actividad sinérgica de los diferentes grupos de bacterias involucradas en la digestión anaerobia de la materia orgánica. ....	25
Figura 3. Diagrama del proceso de una laguna anaeróbica.....	25

### Lista de Graficas

Gráfica 1. Modelo de Vincent .....	47
Gráfica 2. Relación de remoción DBO método Maraiz .....	52

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición típica promedio de las aguas residuales.....	21
Tabla 2. Parámetros de diseño típicos para lagunas de estabilización .....	24
Tabla 3. Criterios de diseño para lagunas anaerobias en función de la temperatura.....	33
Tabla 4. Relación entre los parámetros en lagunas anaerobias .....	34
Tabla 5. Marco legal.....	34
Tabla 6. Procedimiento y análisis de las muestras .....	42
Tabla 7. Resultados de parámetro DBO <sub>5</sub> .....	44
Tabla 8. Dimensiones del sistema lagunar .....	44
Tabla 9. Resultados DBO <sub>5</sub> en muestras.....	45
Tabla 10. Características del sistema .....	46
Tabla 11. Constante de remoción metodología experimental .....	46
Tabla 12. Datos modelo de Vincent .....	47
Tabla 13. Constante de remoción k método de Vincent .....	48
Tabla 14. Eficiencia de remoción para lagunas anaerobia. ....	48
Tabla 15. Eficiencia de remoción.....	49
Tabla 16. Resultados DBO <sub>5</sub> .....	50
Tabla 17. Características del sistema .....	51
Tabla 18. Resultados muestras laguna facultativa.....	51
Tabla 19. Remoción de DBO método de mezcla completa .....	52
Tabla 20. Constante k métodos de Marais y Vincent.....	53
Tabla 21. Eficiencia de remoción laguna facultativa .....	53
Tabla 22. Resultados de muestras PTAR .....	55
Tabla 23. Rangos de eficiencia en los procesos de tratamiento .....	56
Tabla 24. Ecuación laguna facultativa y anaerobia.....	57

## Listada de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Hallar la DBO.....	26
Ecuación 2. Reacción factor k en función temperatura.....	27
Ecuación 3. Mezcla completa y cinemática de primer orden.....	30
Ecuación 4. Flujo arbitrario.....	31
Ecuación 5. Constante a .....	31
Ecuación 6. Número de dispersión según Polprasert .....	31
Ecuación 7. Número de dispersión según Sáenz.....	31
Ecuación 8. Modelo de pistón .....	31
Ecuación 9. Modelo semiempírico de Marais .....	32
Ecuación 10. Modelo semiempírico de Gloyna .....	32
Ecuación 11. Correlación sudafricana.....	32
Ecuación 12. Periodo de retención correlación sudafricana.....	32
Ecuación 13. Carga orgánica volumétrica.....	34
Ecuación 14. Carga orgánica removida, determinada en Zipaquirá.....	39
Ecuación 15. Carga orgánica removida, en función del periodo de retención .....	39
Ecuación 16. DBO total .....	45
Ecuación 17. Factor K.....	45
Ecuación 18. Concentración de DBO.....	46
Ecuación 19. Concentración de DBO.....	46
Ecuación 20. Concentración de DBO.....	46
Ecuación 21. Concentración de DBO.....	46
Ecuación 22. Método experimental.....	47
Ecuación 23. Constante K de la ecuación de Vincent.....	48
Ecuación 24. Determinación de la eficiencia de remoción .....	49
Ecuación 25. Mezcla completa.....	50
Ecuación 26. k de la ecuación de mezcla completa .....	50

### Anexo A. Registro fotográfico

Registro fotográfico 1. Río Subachoque al ingreso del sistema.....	64
Registro fotográfico 2. Estructura de cribado y aforado al ingreso del sistema.....	64
Registro fotográfico 3. Laguna Anaerobia.....	65
Registro fotográfico 4. Laguna facultativa.....	65
Registro fotográfico 5. Tubería conducción hacia entrega efluente.....	66
Registro fotográfico 6. Entrega al río Subachoque .....	66

### Anexo B. Reportes de laboratorio

Reportes de laboratorio 1. Primera muestra 45911-1 .....	67
Reportes de laboratorio 2. Primer muestreo: 45911-2 .....	68
Reportes de laboratorio 3. Primer muestreo: 45911-3 .....	69
Reportes de laboratorio 4. Primer muestreo: 45911-4 .....	70

## RESUMEN

Un problema que se presenta al diseñar lagunas facultativas, es la determinación del valor correcto de las constantes cinéticas a utilizar, ya que este valor es afectado por parámetros ambientales y de carga orgánica. Por lo que no es posible recomendar un valor general, la tendencia es determinar estos valores en forma regional y generar ecuaciones de diseño en función de los parámetros que más predominen a cada caso. En este trabajo se determinaron las constantes de reacción de primer orden para la remoción de  $\text{DBO}_5$ , en un sistema lagunar ubicado en el municipio de Madrid Cundinamarca Colombia. El sistema está integrado por 2 lagunas en serie: anaerobia y facultativa con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 1.98 y 1.73 días respectivamente. El agua residual a tratar es de tipo municipal con descargas de la zona industrial de productos lácteos y un rastro municipal.

En el sistema lagunar la eficiencia de remoción de carga orgánica (DBO) fue de 42.5 %, Con respecto a las constantes cinéticas en laguna anaerobia se determinó una K bajo el modelo experimental. Los coeficientes de correlación más altos se obtuvieron al aplicar el modelo de mezcla completa resultando una K de  $0.378 \text{ d}^{-1}$  (días) y una con una eficiencia de remoción de la DBO del 14,76 %, y en la laguna facultativa y una K de  $0.213 \text{ d}^{-1}$  (días) 42,5 %.

**Palabras clave:** Constante de reacción de primer orden para la remoción de  $\text{DBO}_5$ .

## ABSTRACT

A problem that arises when designing facultative gaps is the determination of the correct value of the kinetic constants to be used, since this value is affected by environmental and organic load parameters. So it is not possible to recommend a general value, the tendency is to determine these values in a regional way and generate design equations according to the parameters that most prevail in each case. In this work, the first-order reaction constants for the removal of  $\text{BOD}_5$  were determined in a lagoon system located in the municipality of Madrid Cundinamarca, Colombia. The system is composed of 3 gaps in series: anaerobic, facultative and maturation with hydraulic retention times (TRH) of 8.71, 5.44 and 5.44 days respectively. The wastewater to be treated is municipal with discharges from the industrial zone of dairy products and a municipal trail.

In the lagoon system, the efficiency of removal of organic load (BOD) was 78.80%, and fecal coliform 99.24%. With respect to the kinetic constants in the anaerobic lagoon, a K of 1.8

days-1 was determined under Vincent's model. The highest correlation coefficients were obtained by applying the dispersed flow model resulting in a K of 0.3411 days-1 and a Kb of 1.4796 days-1 in the facultative pond and a K of 0.0366 days-1 and Kb of 0.5704 days-1 for the maturation lagoon.

**Key words:** First, order reaction constant for the removal of BOD5.

## INTRODUCCIÓN

Una laguna de estabilización de aguas residuales es una estructura simple para embalsar agua de poca profundidad (entre 1 a 2 metros) y con períodos de retención relativamente grandes (por lo general más de 10 días), en donde las aguas residuales al ser descargadas, se realiza en forma espontánea un proceso conocido como auto depuración o estabilización natural.

Los parámetros utilizados para el análisis de la calidad del agua de las lagunas facultativas de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Madrid, Cundinamarca y la calidad de sus descargas, son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) que caracteriza la carga orgánica, y los sólidos suspendidos.

Durante muchos años solo nos preocupó el tratamiento para el abastecimiento de la demanda de agua potable. Pero con el crecimiento de la población mundial y el uso de los recursos naturales se vio seriamente afectados los cuerpos de agua que en últimas son los que reciben la carga contaminante, siendo este un tema de preocupación para los especialistas en recursos hídricos, lo que nos llevó al desarrollo del presente trabajo.

En el que se obtuvo información sobre las características del agua del sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Madrid, Cundinamarca y se analizó el comportamiento de la constante de remoción de la demanda biológica de oxígeno DBO, con el fin de evaluar la variación de éstas en el tiempo y en el espacio.

## **1. GENERALIDADES TRABAJO DE GRADO**

### **1.1 Línea de investigación**

La línea de investigación del proyecto corresponde a gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades en el área del Desarrollo humano y sostenible (Universidad Católica de Colombia, 2016).

### **1.2 Planteamiento del problema**

El sector en estudio está ubicado en el municipio de Madrid, Cundinamarca, en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de esta localidad, la cual cuenta con una serie de lagunas facultativas en su sistema de tratamiento y se desea saber qué calidad presenta el agua de sus descargas al efluente. Ya que la función principal es eliminar los contaminantes que trae el agua provenientes de las descargas de agua residuales tanto domiciliaria como industrial y devolverla, libre de organismos contaminantes, a la corriente del cauce correspondiente, pero cuando uno de estos procesos falla o no funciona en el nivel indicado, los demás procesos también fallan y la eficiencia de la PTAR disminuye, siendo esto perjudicial para el medio ambiente y para la salud humana y es ahí nuestro enfoque de interés en las condiciones de entrega del agua una vez haya pasado por el proceso realizado en las lagunas facultativas.

Y es necesario realizar estudios para el análisis de la calidad del agua en lagunas facultativas, a través de la obtención de datos de carga orgánica, medidas en DBO; que caracteriza la carga orgánica. Con el propósito de identificar la calidad del agua y así, garantizar que el diseño de este tipo de tratamiento de agua residual sea más eficiente, al mejorar las condiciones de autodepuración.

#### **1.2.1 Antecedentes del problema**

Las plantas de tratamiento de aguas residuales son importantes para la comunidad, ya que éstas cumplen la función de reducir los contaminantes del agua que se generan en una población, contribuyendo con la protección del medio ambiente y la salud de las personas que están expuestas al contacto con estos vertimientos. En Colombia, se estima que alrededor de 4.400.000 y 3.300.000 personas se han visto afectadas (periodo comprendido entre 1991-1997) por enfermedades diarreicas respectivamente y que implican costos de tratamiento de la enfermedad, así como costos por pérdida de días de trabajo, razón por la cual se expide la resolución Plan Nacional del Manejo de Aguas Residuales de 2004, en el cual se establece el manejo de vertimientos de aguas residuales domiciliarias e industriales con el fin de dar manejo adecuado al tratamiento de dichas aguas.

Los cuerpos receptores son utilizados como sitio de disposición de los vertimientos de residuos líquidos de actividades tanto productivas como domiciliarias.

La materia orgánica generada por las actividades domésticas en 1999 fue 482.193 ton (1321 ton/día) medida como DBO, de las cuales se trató apenas 4%, para un vertimiento neto de 462.759 toneladas. En este mismo año la generación total de DBO para el sector industrial fue de aproximadamente 162.000 toneladas.

Un estimativo del caudal de aguas residuales generado por los centros urbanos identifica que en Colombia se están arrojando a los cuerpos de agua cerca de  $67\text{m}^3/\text{s}$ , en donde Bogotá representa más del 15.3 %, Antioquia el 13 %, Valle del Cauca el 9.87% y los demás departamentos están por debajo del 5%.

Esta proporcionalidad condiciona el grado de impacto sobre las corrientes hídricas, y marca una tendencia de impacto en las regiones con mayor número de ocupación lo cual genera un alto grado de demanda de recursos naturales. .

### **1.3 Antecedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales**

El predio donde se ha localizado la planta de tratamiento de aguas residuales, es de propiedad del Municipio y se encuentra situado en predios de la Hacienda Casablanca en el límite del perímetro urbano, en las coordenadas, Latitud  $4^{\circ} 43' 59''$  Norte, Longitud  $74^{\circ} 16' 1''$  Oeste y una altura sobre el nivel del mar de 2.554 msnm.

Los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo son prestados por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Madrid E.A.A.A.M ESP, Empresa Industrial y Comercial del Estado (EICE) en área urbana y parte del sector rural.

La EAAAM se encarga de prestar el servicio de alcantarillado en el casco urbano. Según datos del DANE, la cobertura de alcantarillado para el año 2005 era de 99,39%. El casco urbano del municipio de Madrid, de acuerdo con el destino final que se les da a las aguas servidas, se divide en cuatro zonas: la primera zona corresponde a las aguas residuales aportadas a Madrid II del sector del Sosiego que corresponde aproximadamente a un 30% del área construida ( $1.880.108\text{ m}^2$ ); la segunda zona corresponde a las aguas residuales provenientes de los barrios Lorena, Echavarría, Amparito y Escallón que drenan a la PTAR de Echavarría, que corresponde al 10% del área construida ( $446738\text{ m}^2$ ); la tercera zona drena hacia la PTAR Madrid I, a ésta van las aguas del

sector central o antiguo del municipio y aportes menores del norte y occidente, que representa aproximadamente el 30% del área construida ( $1.936.043,62\text{m}^2$ ); la zona cuatro corresponde a las aguas residuales provenientes de los barrios Loreto II, el Danubio, El Carmen, El Edén que representa aproximadamente el 30 % del área construida.

Figura 1. Ubicación PTAR-Madrid I



Fuente: Google Earth, 2018.

### **1.3.1 Pregunta de investigación**

¿Cómo podemos estimar el coeficiente de remoción K, apropiado a emplear en el diseño de lagunas facultativas de la planta de tratamiento de Madrid, Cundinamarca que cumpla con los parámetros de calidad del agua?

### **1.4 Justificación**

En el año 2002, Colombia contaba con 237 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en 235 municipios, lo que representaba una cobertura de 21% en población. Al finalizar el 2005 el número de plantas aumentó a 401 en 345 municipios, alcanzando una cobertura de 31%, incluyendo 10 sistemas en construcción. Pese a este esfuerzo, que resulta importante, todavía hay 753 municipios sin plantas lo que equivale al 69% de la población del país una cifra bastante considerable.

Los datos representan para Colombia una deficiencia en la cobertura del tratamiento de sus aguas residuales. Es por esto que las corporaciones autónomas han puesto como meta principal, dentro de los programas de descontaminación del recurso hídrico, la promoción y financiación de sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. Esto ha llevado a implementar diversos tipos de tratamiento y como es lógico se han encontrado inconvenientes en su funcionamiento que apenas se comienzan a detectar, siendo este un espacio de importancia para los especialistas en recursos hídricos de la universidad católica de Colombia, para profundizar sus estudios en el mejoramiento de dichas técnicas.

La contaminación de los recursos hídricos en Colombia por vertimientos de aguas residuales, representa una problemática de saneamiento público y ambiental, debido a que muchas de estas aguas son descargadas a los cuerpos de agua superficiales sin ningún tipo de tratamiento, por lo que es importante implementar mecanismos de tratamiento de aguas residuales, que se ajuste a las condiciones socioeconómicas propias de cada población.

La necesidad de realizar estudios que analicen el funcionamiento de estos sistemas implementados en nuestro país se hace prioritaria, por ser fundamentados en diseños realizados en otros países, los cuales no cuentan con las mismas características geográficas, climatológicas y de disponibilidad de recursos; para la búsqueda de minimizar los problemas de funcionamiento o impacto ambiental que con frecuencia se percibe en la mayoría de los casos en que se emplea esta técnica para tratamiento de las aguas residuales en muchas zonas de Colombia.

En consecuencia, la finalidad de esta investigación fue analizar el comportamiento actual del sistema para el tratamiento de las aguas residuales del municipio de Madrid, Cundinamarca, de tal forma que permita describirlo con la mejor aproximación y así interpretar su funcionamiento en términos de calidad del agua.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

Analizar mediante ensayos de laboratorio el coeficiente de remoción (k), en lagunas facultativas de la planta de tratamiento de agua residuales del municipio de Madrid, Cundinamarca.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Recopilar la información de resultados de análisis de aguas residuales provenientes del sistema de tratamiento lagunar.
- Analizar el funcionamiento las características propias de diseño del coeficiente de remoción (K) de las lagunas facultativas para el tratamiento de aguas residuales la zona de Madrid, Cundinamarca.
- Realizar el diagnóstico y verificar si los parámetros cumplen con la normatividad ambiental vigente.

## 2. MARCO DE REFERENCIA

### 2.1 Marco teórico

La contaminación ambiental es un problema que se ha venido agravando con el tiempo y que debe ser atendido de manera eficaz. El tratamiento de las aguas residuales, es decir, aquellas cuyas características han sido modificadas por diversos usos, es una manera de controlar la contaminación de los cuerpos de agua donde éstas son descargadas, con la finalidad de remover de éstas la mayor cantidad de residuos que pueden causar contaminación y asegurar de esta forma, el cuerpo receptor tenga una calidad de agua tal que pueda sustentar los usos que se le dé a dicho cuerpo de agua, aguas abajo de la descarga, de acuerdo a la normatividad ambiental vigente.

En la tabla 1 se presenta el rango de valores de los principales parámetros en los que normalmente fluctúa la composición de las aguas residuales domésticas.

Tabla 1. Composición típica promedio de las aguas residuales.

Parámetro	Rango	Valor promedio	Valor promedio estrato medio en Colombia
pH, unidades	6.5 - 7.5	7.1	7.2
DBO <sub>5</sub> , mg/l	90 - 450	230	265
DQO, mg/l	170 - 850	450	415
Grasas y aceites	50 - 180	70	80
Fósforo total, mg/l P	2 - 12	8	5
Nitrógeno total, mg/l N	12 - 90	45	28
Sólidos susp. totales, mg/l	150 - 450	230	268
Sólidos susp. volátiles, mg/l	75 - 340	175	201
Sólidos sedimentables, ml/l	3 - 12	8	6
Cloruros, mg/l	25 - 80	35	28
Sulfatos, mg/l	15 - 40	25	25
Aporte DBO <sub>5</sub> , g/(hab. día)	40 - 65	50	54
Aporte DQO, g/(hab. día)	60 - 110	98	96
Aporte SS, g/(hab. día)	45 - 80	68	62

Fuente: Cuervo, 2007.

El tratamiento de las aguas residuales puede llevarse a cabo mediante procesos físicos, químicos o biológicos. Los mecanismos de tratamiento pueden ser alternados de diferentes maneras, lo que inevitablemente dará como resultado diferentes secuencias de operaciones y procesos o trenes de tratamiento. Específicamente, el tratamiento de las aguas residuales domésticas, se realiza en dos o tres etapas: tratamiento físico, denominada también primera etapa o tratamiento primario; tratamiento biológico, denominada también segunda etapa o tratamiento

secundario y tratamiento avanzado, denominada también tercera etapa o tratamiento terciario. Esta última etapa se considera como algo fuera de lo común para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, siendo más comúnmente utilizadas la primera y la segunda etapa.

Dentro de la gama de procesos biológicos es factible implementar: lodos activados de tipo convencional y sus modificaciones, lagunas aireadas, biofísicos, filtro percolador, RAMLFA, humedales y lagunas de estabilización.

Los tratamientos biológicos se clasifican en aerobios, anaerobios y facultativos. En el primer caso se requiere de la presencia de oxígeno disuelto en el medio; en el segundo caso el oxígeno está ausente; y en el tercero se pueden presentar las dos simultáneamente en el reactor.

### **2.1.1 Tratamiento de aguas residuales domésticas por medio de lagunas de estabilización**

Las lagunas de estabilización son lugares de almacenamiento de aguas residuales, relativamente grandes y de poca profundidad, provistas de estructuras en tierra abiertas al sol y al aire y cuyo fin es el de lograr el tratamiento de las aguas residuales a través de procesos naturales, pero controlados de forma que genere excelentes resultados para la remoción de la carga orgánica.

En la implantación de esta tecnología se han definido como objetivos fundamentales, remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación en la fuente receptora y eliminar los microorganismos potencialmente patógenos que representan un grave peligro para la salud. Aunque en muchas ocasiones se presenta un tercer objetivo y es utilizar su efluente con otras finalidades, como agricultura o piscicultura no son tendencia muy marcada en nuestro país.

### **2.1.2 Clasificación de las lagunas**

Existen varias formas de clasificar las lagunas. De acuerdo con el contenido de oxígeno, pueden ser: aeróbicas, anaeróbicas y facultativas. Si el oxígeno es suministrado artificialmente con aireación mecánica o aire comprimido se denominan aireadas. Con base en el lugar que ocupan respecto a otros procesos, las lagunas pueden clasificarse como: primarias o de aguas residuales crudas, secundarias, si reciben efluentes de otros procesos de tratamiento y de maduración, si su propósito fundamental es reducir el número de organismos patógenos.

Las lagunas aeróbicas que han sido también referidas como fotosintéticas, son estanques de profundidad reducida (0.5 a 1.0 m) y diseñadas para una máxima producción de algas. En estas lagunas se mantienen condiciones aeróbicas a todo nivel y tiempo, y la reducción de materia orgánica es efectuada por acción de organismos aerobios. Estas unidades han sido utilizadas preferentemente para propósitos de producción y cosecha de algas y su uso en tratamiento de desechos no es generalizado.

Las lagunas anaeróbicas son reservorios de mayor profundidad (2.5 a 5.0 m) y reciben cargas orgánicas más elevadas, de modo que la actividad fotosintética de las algas es suprimida, encontrándose ausencia de oxígeno en todos sus niveles. En estas condiciones, estas lagunas actuarán como un digestor anaeróbico abierto sin mezcla y debido a las altas cargas orgánicas que soportan, el efluente contiene un alto porcentaje de materia orgánica que requiere de otro proceso adicional para complementar el tratamiento.

Las lagunas facultativas son estanques de profundidad más reducida (1.5 a 2.5 m), en las cuales la actividad fotosintética de las algas ejerce un papel preponderante en la capa superior, al mantener un cierto nivel de oxígeno disuelto que varía de acuerdo a la profundidad y hora del día. En zona del fondo se depositan los sólidos suspendidos que sufren un proceso de reducción por estabilización anaerobia.

Las lagunas de maduración o pulimento son estanques cuya altura está entre 0.5 y 1.0 m, son utilizadas como procesos de tratamiento terciario y diseñadas con el propósito exclusivo de reducir los organismos patógenos.

Tabla 2. Parámetros de diseño típicos para lagunas de estabilización

Parámetro	Tipo de lagunas				
	Aerobia	Facultativa	Maduración	Anaerobia	Aireada
1. Régimen de flujo	M.I	....	M.I	....	C.M
2. Tamaño de laguna (ha)	0,25 - 1,0	1.0 - 4.0(*)	1 - 4,0	0,2 - 1 (*)	1 - 4 (*)
3. Operación	serie	serie o paralelo	serie o paralelo	serie o paralelo	serie o paralelo
4. Tiempo de retención (días)	4.0 - 6.0	7,0 - 10,0	5.0 - 20	10.0 - 20.0	3.0 - 10
5. Profundidad (m)	0.30 - 0.50	1.8 - 2.5	1.0 - 1.5	2.5 - 5.0	3.0 - 5.0
6. pH	6.5 - 10.5	6.5 - 9.0	6.5 - 10.5	6.8 - 7.2	6.5 - 8.0
7. Carga de DBO <sub>5</sub> (Kg/ha.d)	80 - 160	200 - 400 +	15 - 60	400 - 1200	800 - 1500
8. Conversión de la DBO <sub>5</sub>	80 - 95	80 - 95	60 - 80	40 - 80	80 - 95
9. Sólidos susp. efluente (mg/l)	150 - 300 <sup>a</sup>	40 - 100 <sup>a</sup>	10 - 30 <sup>a</sup>	80 - 160	80 - 250 <sup>a</sup>

M.I = mezclado Intermitente (\*) = múltiples

+ = aumentando la altura hasta 2.5 m puede ampliarse hasta 400

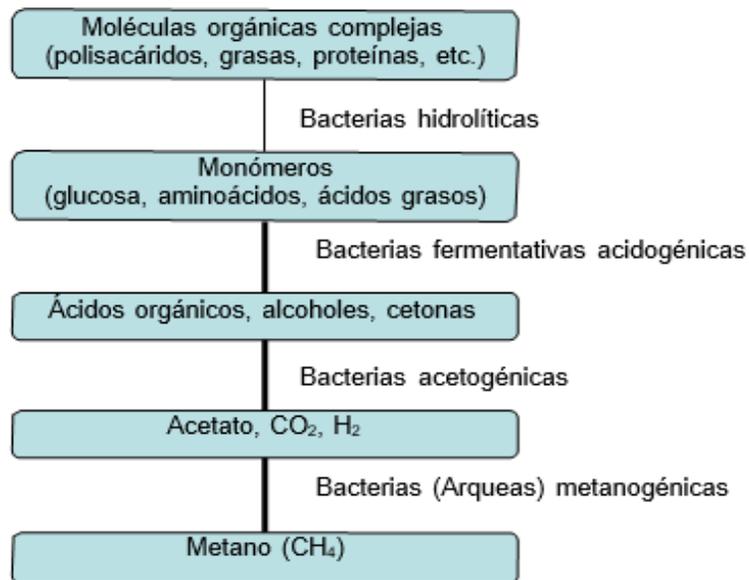
<sup>a</sup> = incluye algas, microorganismos y sólidos suspendidos residuales del afluente

C.M = completamente mezclado

### 2.1.3 Ecología de las lagunas anaerobias

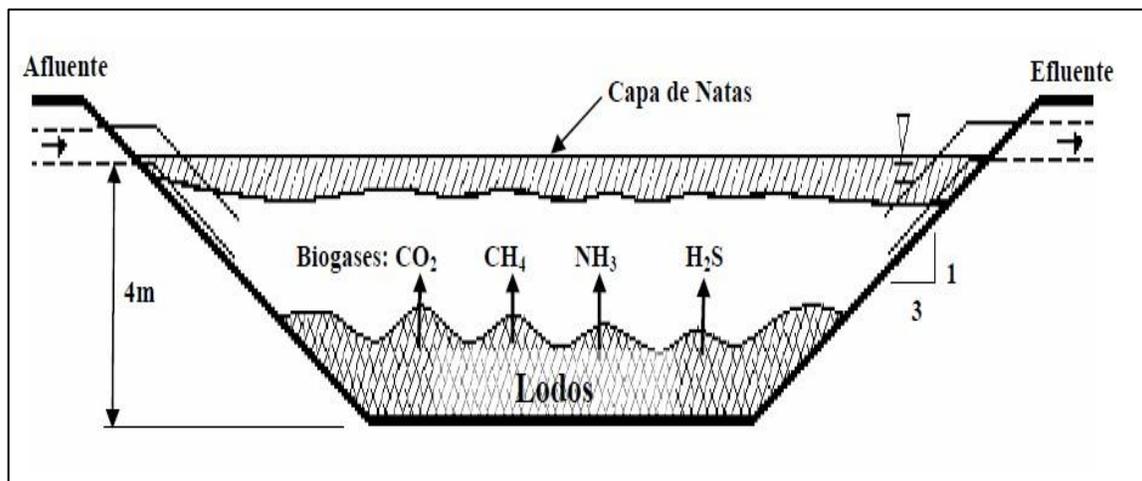
La laguna anaerobia es un biorreactor que combina la sedimentación de sólidos y su acumulación en el fondo, con la flotación de materiales del agua residual en la superficie y con biomasa activa suspendida en el agua residual o adherida a los lodos sedimentados y a la nata flotante. Una laguna anaerobia puede considerarse como un proceso anaerobio de tasa baja, en el cual la materia orgánica es estabilizada mediante su transformación en dióxido de carbono y metano. Usualmente son abiertas a la atmósfera, pero podrían cubrirse para recoger el metano producido y para controlar la emisión de olores.

Figura 2. Actividad sinérgica de los diferentes grupos de bacterias involucradas en la digestión anaerobia de la materia orgánica.



Fuente: Romero (2005, pág. 15).

Figura 3. Diagrama del proceso de una laguna anaeróbica



Fuente: Oakley, 2005.

#### 2.1.4 Lagunas aeróbicas

Son lagunas en las cuales la estabilización de la materia orgánica existente se realiza en condiciones completamente aeróbicas en presencia de oxígeno (Romero, 2005, pág. 16).

También llamadas lagunas de alta producción de biomasa, la Comisión Nacional del Agua de México explica que tienen profundidades entre 0.3 m y 0.45 m y la reducción de la materia orgánica es realizada por organismos aeróbicos. Este tipo de lagunas ha tenido buenos resultados en climas cálidos y con alta radiación solar, para la producción de cosecha de algas; sin embargo, su uso en el tratamiento de aguas residuales no es generalizado. La ecuación para hallar la DBO es:

Ecuación 1. Hallar la DBO

$$y = L(1 - e^{-K\theta}) = L(1 - e^{-10^{-K\theta}})$$

Donde:

y: DBO ejercida por el agua después de un tiempo t, mg/L

L: DBOUC, mg/L, o DBO remanente del agua para t = 0

K: constante de velocidad de reacción de la DBO, base natural, días<sup>-1</sup>

θ: tiempo de reacción, días.

### 2.1.5 Factores de influencia

La eficiencia de una laguna, medida como el grado de estabilización de la materia orgánica que entra, es dependiente no sólo de la cinética de los procesos biológicos, sino también, de las características hidráulicas del sistema. El comportamiento hidráulico y biológico de todas las lagunas de estabilización es afectado por diferentes factores, algunos son controlables por el hombre y otros no. Sin embargo, todos deben ser tenidos en cuenta en el diseño del proyecto, cuidando de minimizar el impacto ambiental que pueden ocasionar los factores no controlables por el hombre, según romero 2005 comunes son (Romero, 2005):

- **Temperatura.** Las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son influenciadas notoriamente por la temperatura. Es una variable que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto a la velocidad de la fotosíntesis como el metabolismo de las bacterias responsables de la remoción de la materia orgánica. Esos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas.

En nuestro medio tropical, donde no se presentan las variaciones estacionales que se dan en otras regiones, y teniendo en cuenta la gran capacidad calorífica del agua almacenada en grandes volúmenes, las variaciones de temperatura en el ambiente no afectan notoriamente la temperatura del agua en la laguna. Es el caso de estudio realizado durante 30 días continuos en un sistema de

lagunas de estabilización en el oriente cercano a Medellín, el cual mostró que a pesar de las variaciones bruscas de temperatura en el ambiente (10 ° C en horas de la noche y 28 ° C al medio día) los cambios de temperatura en el agua no excedieron de 1 ° C, es decir, la temperatura es prácticamente constante para todo el volumen de agua, con una temperatura levemente inferior a la media de aquella que la laguna presenta en las horas que la temperatura ambiente es más baja.

En las horas del día, en las cuales la temperatura ambiente supere la temperatura media del agua, ésta absorberá energía, y en la laguna se originará el fenómeno de estratificación térmica. Cuanto más elevada es la temperatura ambiente en relación con la del agua, mayor será el gradiente térmico, y por lo tanto, más notoria será la estratificación térmica.

Dentro de la cinética del proceso biológico es necesario determinar la tasa de remoción de la materia orgánica, la cual depende a su vez de la constante de velocidad de reacción ( $k$ ), que varía con la temperatura de acuerdo con la siguiente relación:

Ecuación 2. Reacción factor  $k$  en función temperatura

$$\frac{KT}{K20^{\circ}C} = \theta^{(T-20)}$$

Donde,

$KT$  = coeficiente de velocidad de reacción a  $T$  ° C

$K20^{\circ}C$  = coeficiente de velocidad a 20 ° C

$\Theta$  = constante para corrección de temperatura

El coeficiente  $k$  puede encontrarse a partir de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO).

De acuerdo a la cinética bioquímica una variación de 10°C en la temperatura produce cambios de aproximadamente 50% en la actividad biológica. Igual consideración debe hacerse para la actividad que se ejerce en los lodos sedimentados, donde la digestión anaerobia es mucho más sensible a las bajas temperaturas, especialmente por debajo de los 17°C. Sin embargo, esta actividad aumenta en proporción de cerca de cuatro veces por cada 5°C de elevación para temperaturas por debajo de 22° C.

La temperatura también tiene influencia en la tasa de reducción bacteriana, implicando que la tasa de mortalidad de coliformes fecales en lagunas de estabilización es altamente dependiente de la temperatura, donde a mayor temperatura mayor será la remoción de estos microorganismos.

- **Fotosíntesis.** En las lagunas facultativas, la materia orgánica del agua residual doméstica es oxidada por las bacterias heterotróficas, utilizando el oxígeno producido por las algas. Las algas, utilizando energía solar, con el  $\text{CO}_2$  y el amoníaco producido por las bacterias, sintetizan materia orgánica y producen oxígeno. Durante el día, las algas pueden producir oxígeno en exceso del requerido para la respiración y crear condiciones de sobresaturación y pérdida de OD a la atmósfera. La oxidación fotosintética permite cargas de DBO de hasta  $25 \text{ g DBO/m}^3 \text{ d}$ ; pero en ausencia de oxigenación fotosintética, la oxigenación atmosférica sólo permite cargas de hasta  $5 \text{ g DBO/m}^3 \text{ d}$ , para condiciones aeróbicas.

En muchos casos, las algas obtienen el carbón necesario para su crecimiento a partir del ion bicarbonato, cambiando los componentes de la alcalinidad y haciendo que predominen los carbonatos y los hidróxidos. Si el agua contiene concentraciones altas de calcio, el calcio se precipitará como carbonato y ayudará a prevenir el aumento continuo de pH. En lagunas anaeróbicas, con penetración de luz solar, las bacterias rojas del azufre son capaces de efectuar fotosíntesis, usando  $\text{H}_2\text{S}$  en vez de  $\text{H}_2\text{O}$  como donante de hidrógeno.

- **Vientos.** La acción de los vientos es útil cuando es posible la homogenización de la masa líquida, llevando oxígeno de la superficie a las capas más profundas, haciendo que el afluente y los microorganismos, sean dispersados en toda la extensión de esa masa. Auxilian al movimiento de las algas, principalmente de aquellas especies desprovistas de movimiento propio y consideradas grandes productoras de oxígeno, como las algas verdes del género *Chlorella*. Cuando la fotosíntesis no fuere suficiente al existir déficit de oxígeno, el viento puede contribuir para la transferencia y difusión de oxígeno de la atmósfera hacia la masa líquida. Como medida preventiva, se deben construir las lagunas en lugares donde la acción de los vientos dominantes no esté en dirección de las viviendas, considerando además que las lagunas anaeróbicas, las cuales pueden expedir olores desagradables, deben ser construidas por lo menos a 500 o 1000 metros de la comunidad.

- **Precipitaciones.** El efecto inmediato de la lluvia es provocar un aumento del caudal de entrada, por lo que el tiempo de residencia del agua disminuye. Lluvias intensas pueden diluir el contenido de las lagunas rasas, afectando el alimento disponible para la biomasa. El aumento repentino del caudal podrá generar en el efluente grandes cantidades de sólidos, arrastre

significativo de la población de algas y el acarreamiento de materiales inorgánicos, principalmente arcilla. Para evitar estos problemas, es conveniente la construcción de estructuras con rebose lateral para desviar los excesos de agua afluyente y además deben construirse zanjas desviadoras de aguas lluvias para contener inundaciones.

- Área superficial. El área superficial de una laguna de estabilización está determinada en función de la carga orgánica, usualmente expresada en términos de DBO<sub>5</sub>, aplicada por día, principalmente para las lagunas facultativas. En climas cálidos, cargas orgánicas variando de 150 a 400 Kg. DBO<sub>5</sub>/ha. Día, han sido usadas con éxito para las lagunas facultativas. Las cargas más bajas se aplican a temperaturas del aire en torno a 20 ° C y las más altas temperaturas próximas a 30 ° C. Las cargas superficiales que exceden de 200 a 250 Kg. DBO<sub>5</sub>/ha. Día, han sido objeto de problemas ocasionales de malos olores, en cuanto que las cargas que excedan 400 Kg. DBO<sub>5</sub>/ha. Día, probablemente llevan a la anaerobiosis, esto es, ausencia de oxígeno disuelto y/o a una caída brusca en la eficiencia total del sistema.

- Radiación solar. La luz es fundamental para la actividad fotosintética. Esta depende no sólo de la luz que alcanza la superficie del agua, sino de la que penetra en profundidad. Dado que el medio es normalmente muy turbio, debido sobre todo a la presencia de las mismas algas, la luz que penetra en la laguna se atenúa rápidamente y se anula a poca distancia de la superficie. Puesto que la intensidad de la luz varía a lo largo del día y del año, la velocidad de crecimiento de las algas varía también de la misma forma. Este fenómeno da lugar a dos efectos fundamentales: el oxígeno disuelto y el pH del agua presentan valores mínimos al final de la noche, y aumentan durante las horas de luz solar hasta alcanzar valores máximos a media noche. A partir de este punto los valores decrecen de nuevo a lo largo de la noche.

- Tiempo de retención. La actividad biológica en las lagunas está influenciada por las características de circulación del agua. Cuando se proyecta una laguna, se calcula el tiempo necesario para alcanzar un determinado grado de depuración. Desde el punto de vista de la depuración lo que importa es realmente todo el material que entra en la laguna permanece en ella durante ese tiempo, o si hay diferencias importantes entre el tiempo que una parte u otra del fluido permanece en la laguna. Cuando esto ocurre, la fracción que atraviesa rápidamente el estanque alcanza un grado menor de estabilización que la que permanece embalsada durante más tiempo. Estas diferencias en el tiempo real de residencia provocan siempre la disminución de la eficacia de la depuración.

- PH. La actividad fotosintética demanda un consumo grande de CO<sub>2</sub> por las algas. Además, el uso factible de carbono, a partir del ion bicarbonato y la producción de ion OH<sup>-</sup> hace que se obtengan períodos de pH altos en las lagunas facultativas o aeróbicas. Durante las últimas horas diurnas se pueden observar valores de pH superiores a 9. El desarrollo de un pH demasiado alto hace que la actividad bacteriana disminuya, se reduce la producción de CO<sub>2</sub> y se limita el proceso simbiótico.

- Oxígeno disuelto. Las concentraciones de oxígeno disuelto, OD, en la laguna, son el reflejo de la intensa actividad fotosintética. Dependiendo de cada estanque, en una laguna facultativa la capa oxigenada superficial presenta una variación diurna de OD y puede que el oxígeno disminuya notablemente durante la noche; pero también puede ocurrir que se observe concentraciones de sobresaturación de OD durante el día, hasta valores determinados, en algunos estudios, de 36 mg/l.

- DBO y sólidos suspendidos. La producción de efluentes, con DBO alta, en muchas lagunas de estabilización, es el resultado de crecimiento de biomasa suspendida en la laguna y no al escape de DBO del afluente a través de ella; como lo confirman los ensayos de DBO sobre efluentes filtrados y no filtrados. Esto realza la capacidad de las lagunas para tratar aguas residuales, pero también enfatiza la necesidad de separar apropiadamente la biomasa algal y bacteriana del efluente, si se desean efluentes de alta calidad en términos de DBO y sólidos suspendidos totales.

## 2.1.6 Modelos matemáticos

### 2.1.6.1 Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden

Ecuación 3. Mezcla completa y cinemática de primer orden

$$C = \frac{C_0}{1 + K\theta}$$

Donde:

CO: Concentración de DBO en el afluente, mg/L

C: Concentración de DBO en el efluente, mg/L

K: Constante de reacción de primer orden para remoción de DBO, d<sup>-1</sup> (días)

Θ: Tiempo de retención en el reactor, días

### 2.1.6.2 Modelo de flujo arbitrario

Es usada para un modelo no ideal que combina tanto el flujo de mezcla completa como el flujo pistón.

Ecuación 4. Flujo arbitrario

$$\frac{C}{C_0} = \frac{4ae \left(\frac{1}{2b}\right)}{2a(1+a)^2 e^{\left(\frac{a}{2a}\right)} - (1-a)^2 e^{\left(\frac{-a}{2a}\right)}}$$

Ecuación 5. Constante a

$$\text{En la que } a = \sqrt{1 + 4K\theta d}$$

Para el cálculo del número de dispersión (d), se emplean las ecuaciones de Polprasert y la de Sáenz. Las cuales se ven a continuación:

Ecuación 6. Número de dispersión según Polprasert

$$d = \frac{0.184[\theta V(W + 2Z)]^{0.489} w^{1.511}}{(LZ)^{1.489}}$$

Ecuación 7. Número de dispersión según Sáenz

$$d = \frac{1.158[\theta (W + 2D)]^{0.489} w^{1.511}}{(T + 42.5)^{0.734} (LD)^{1.489}}$$

Donde:

C: Concentración del efluente, mg/L Co: Concentración del afluente, mg/L

K: Constante de reacción de primer orden, días-1

$\theta$ : Tiempo de retención en el reactor, días

d: número de dispersión del flujo, adimensional.

v: Viscosidad cinemática, m<sup>2</sup>/s W: Ancho de la laguna, metros

Z y D: Profundidad del agua en la laguna, metros

L: Longitud entre el afluente y el efluente, metros

T: Temperatura de la laguna; °C

### 2.1.6.3 Modelo de flujo pistón.

Ecuación 8. Modelo de pistón

$$S = S_a e^{-K\theta}$$

Donde:

Sa: DBO afluente, mg/L S: DBO efluente, mg/L

K: Coeficiente de remoción de DBO a la temperatura del líquido.

$\theta$ : Tiempo de retención hidráulica, días

### 2.1.7 Modelos semiempíricos

La Comisión Nacional del Agua asegura que estos modelos combinan conceptos teóricos de carga orgánica e hidráulica, con los resultados obtenidos del análisis de plantas pilotos. Ejemplo esto, son las expresiones halladas por Marais y Gloyna, como se muestra a continuación.

Ecuación 9. Modelo semiempírico de Marais

$$\text{Marais } K = 1,2 * 1,085^{T-35}$$

Ecuación 10. Modelo semiempírico de Gloyna

$$\text{Gloyna } K = 0,8 * 1,084^{T-20}$$

### 2.1.8 Correlación sudafricana

La primera expresión matemática que es propuesta es la correlación sudafricana, la cual ha sido desarrollada para climas tropicales y subtropicales asumiendo una temperatura de 22 °C para el afluente, como muestra Yáñez.

Ecuación 11. Correlación sudafricana

$$S = \frac{S_a}{k_n TRH(S/S_a)^n + 1}$$

Donde:

S: DBO<sub>5</sub> del efluente de la laguna anaerobia, en mg/L

Sa: DBO<sub>5</sub> del afluente de la laguna anaerobia, en mg/L

Kn: Constante de degradación asumiendo mezcla completa, en 1/ días

TRH: Periodo de retención nominal (TRH = V/Q), en días

n: Exponente determinado experimentalmente

Ecuación 12. Periodo de retención correlación sudafricana

$$PR = \frac{(S/s_a - 1)(S/s_a)^n}{K_n}$$

### 2.1.9 Modelo de mezcla completa para lagunas anaerobias

$$K = (s/S_a)^n K_n$$

Donde

K: Coeficiente de degradación global de DBO en una laguna aeróbica, en 1/días

### 2.1.10 Modelo de Vincent

$$S = \frac{S_a}{\left(\frac{S}{S_a}\right)^n K\theta + 1}$$

Donde:

S: DBO del efluente y de la laguna, mg/L

S<sub>a</sub>: DBO del afluente, mg/L

K: Constante de reacción de DBO, d<sup>-1</sup> (días)

θ: Tiempo de retención en el reactor, días

n: exponente, igual a 4.8

### 2.1.11 Modelo empírico en función de la temperatura

Las recomendaciones generales de Mara y Pearson se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Criterios de diseño para lagunas anaerobias en función de la temperatura

TEMPERATURA (°C)	CARGA VOLUMÉTRICA (g/m <sup>3</sup> - día)	REMOCIÓN DE DBO (%)
<10	100	40
- 20	20T-100	2T+20
>20	300	60

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2007

### 2.1.12 Diseño basado en la carga volumétrica

Calculando la carga orgánica volumétrica usando la ecuación 12 y la tabla 4.

Ecuación 13. Carga orgánica volumétrica

$$V = \frac{DBO_i * Q}{COV}$$

Donde:

V = Volumen de la laguna, m<sup>3</sup>

DBO<sub>i</sub>: la concentración inicial de DBO en el afluente, mg/L

Q: Caudal, m<sup>3</sup>/día

COV: Carga orgánica volumétrica de DBO, g/m<sup>3</sup> – día

Tabla 4. Relación entre los parámetros en lagunas anaerobias

TEMPERATURA (°C)	TRH (días)	REMOCIÓN DE DBO (%)
10-15	4-5	30-40
15-20	2-3	40-50
20-25	1-2	50-60
25-30	1-2	60-80

Fuente: Oakley, 2005.

## 2.2 Marco legal

El Marco legal relacionado con la presente investigación se presenta a continuación:

Tabla 5. Marco legal.

<b>NORMATIVIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Resolución 0330 de 2017	<p>Reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo. Así como a los diseños, ejecución de obras, operación y mantenimiento de obras, instalaciones o sistemas propios del sector de agua y saneamiento básico.</p> <p>“Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009”.</p>
Decreto 1076 de 2015	Expedido el 26 de mayo de 2015, para establecer el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
La resolución 0631 de 2015	Expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 7 de marzo de 2015, con el objetivo de fijar los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.
Decreto 2041 de 2014	Determina las autoridades ambientales, así como la competencia que tendrá cada una para expedir la licencia ambiental según el tipo de actividad, proyecto y la dimensión de la misma. Además establece las condiciones para otorgar dicha licencia.
Resolución 1514 de 2012	Establece los términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos (PGRMV) a un cuerpo de agua o al suelo.
Decreto 3930 de 2010	Establece los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico y a los alcantarillados. Es aplicado a las autoridades

<b>NORMATIVIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Resolución 1433 de 2004	Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV. Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV.
Resolución 1096 de 2000	Por el cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS
Titulo D RAS 2000	Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y aguas lluvias
Titulo E RAS 2000	Caracterización de aguas residuales: El propósito del siguiente título es fijar los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales
Resolución 1074 de 1997	Establece concentraciones máximas permisibles para vertimientos de aguas a redes de alcantarillado público.
Ley 142 de 1994	Establece el Régimen de Servicios Públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
Ley 99 de 1993	Busca la creación del Ministerio del Medio Ambiente, la reordenación del Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA).
Ley 09 de 1979	Reglamenta el Código Sanitario Nacional. Art 10. reglamentación de vertimientos; art 14 Se prohíbe la descarga de residuos líquidos; Art 38: Se prohíbe colocar letrinas directamente sobre fuentes de agua
NTC-ISO 5667-10	Calidad del agua, muestreo de aguas residuales

Fuente: Autores.

## 2.3 Estado del arte

En distintas ciudades se han realizado a lo largo de los años una serie de investigaciones enfocadas en el mejoramiento y optimización de los procesos de tratamiento de aguas residuales, sin embargo, es notable la falta de estudios relacionados con lagunas de estabilización para obtener diseños más eficientes.

### 2.3.1 Verificación de dos coeficientes de diseño para lagunas de estabilización

Gran Caimán (Islas Caimán) se verificó el valor del coeficiente de diseño de primer orden de mezcla completa; los coeficientes de reacción de primer orden de  $0,357 \text{ d}^{-1}$  (días) a  $30^\circ \text{C}$ , para la eliminación de  $\text{DBO}_5$  y de  $15,7 \text{ d}^{-1}$  (días) para la eliminación de coliformes fecales, para estanques facultativos. El estudio se realizó a partir de un sistema de lagunas de estabilización, que consta de dos estanques facultativos en paralelo, seguidos por dos estanques de maduración en serie, y que operan con un tiempo total de retención promedio de 21,2 días. La laguna facultativa tenía un área superficial de  $8800 \text{ m}^2$ , un promedio mensual de  $\text{DBO}_5$  de  $95 \text{ mg/L}$  y  $31,1^\circ \text{C}$  de temperatura; mientras que las de maduración tenían  $6400 \text{ m}^2$ , una carga promedio de  $10,1 \text{ mg/L}$  y una temperatura de  $26,6^\circ \text{C}$ .

Los resultados del análisis se realizaron por un periodo de 12 meses (de junio de 1990 a mayo de 1991), arrojando el valor del coeficiente de remoción de coliformes fecales para la metodología de primer orden y mezcla completa, a partir de una regresión lineal entre la  $\text{DBO}_5$  y el coeficiente (K). En lagunas facultativas el coeficiente de reacción promedio, para el modelo de primer orden fue de  $0,168 \text{ d}^{-1}$  (días) con una temperatura estándar de  $30^\circ \text{C}$ ; el cual fue menor al usado en el diseño original ( $0,482 \text{ d}^{-1}$  (días), para  $30^\circ \text{C}$ ). (ELLIS, K. RODRIGUES, C., 1993.).

### 2.3.2 Rendimiento hidráulico de un estanque de estabilización de aguas residuales profundas

En el año 1999, se estudió el rendimiento hidráulico de una laguna de estabilización de aguas residuales profunda, ubicado en el Campus Espinardo de la Universidad de Murcia. Se llevó a cabo en dos estaciones diferentes, invierno y verano.

A partir de los datos experimentales de la  $\text{DBO}_5$  restante se pudieron calcular las constantes cinéticas globales para la degradación de la materia orgánica. Tanto en invierno como en verano, los valores de las constantes ( $k_{20} = 0,46$  y  $0,32 \text{ d}^{-1}$  (días), parecían apuntar a la zona activa del sistema, mostrando un comportamiento fundamentalmente aeróbico (Torres, 1999).

### **2.3.3 Evaluación del coeficiente de reacción (k) para sistemas de lagunas facultativas a gran escala**

En el año 2001 se realizó la evaluación del coeficiente de reacción (K), para sistemas de lagunas facultativas a gran escala. El estudio utilizó dos lagunas facultativas situadas en Brazlandia y Samambaia, en la región medio-oeste de Brasil; para determinar si los coeficientes globales hallados por varios métodos de diseño, pueden ser usados satisfactoriamente en casos regionales.

Se hizo una correlación entre la carga aplicada (DQO) y el coeficiente de reacción (K), con base en un ajuste matemático usando el modelo de flujo disperso. Para ello, se obtuvieron informes mensuales del sistema de lagunaje de los años 1997 a 1998, y se realizó una correlación entre la carga aplicada y el coeficiente de reacción (K). Se utilizó la carga de DQO, en sustitución de la DBO5 habitual; lo cual se hizo posible por la alta correlación que hay entre la DBO5 Y DQO para agua residual doméstica.

El coeficiente fue determinado a partir del ajuste de la ecuación de modelo de primero orden (Arceivala, 1986). Con un  $R^2=0.819$ , los resultados proporcionan un parámetro de diseño regional, sugerido para lagunas facultativas que tratan aguas residuales domésticas en esta región (SOARES, Mayo, 2001).

### **2.3.4 Determinación de los coeficientes de reacción del crecimiento biológico y decaimiento endógeno en las lagunas de estabilización del municipio de Zipaquirá**

En el año 2017, Torres realizó un estudio para determinar los coeficientes de crecimiento microbiano ( $K_d$ ) y el coeficiente de mortalidad microbiana ( $K_s$ ). Con el fin de interpretar su funcionamiento en términos cinéticos y químicos; se tomaron muestras obtenidas de las lagunas ubicadas en el municipio de Zipaquirá en su planta de tratamiento de agua residual, ZIPA II y ZIPA I, la cual cuenta con una laguna anaerobia seguida de una laguna facultativa.

Se analizaron las muestras para determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), que junto con las ecuaciones de carga orgánica volumétrica y la ecuación propuesta por Vincent (Ecuación 4) permitieron determinar que las lagunas anaerobias trabajan con una constante de crecimiento biológico ( $K_s$ ) entre  $1.1 \text{ d}^{-1}$  (días) y  $2.59 \text{ d}^{-1}$  (días); las cuales se acercan a los valores propuestos por otros autores, con base en análisis realizados en lugares con diferentes características climáticas. En primer lugar, se propuso una ecuación para calcular la Carga Superficial Removida ( $C_{sr}$ ) en función de la Carga Orgánica Aplicada ( $C_{sa}$ ), la cual se muestra a continuación (Torres Carvajal, 2017).

Ecuación 14. Carga orgánica removida, determinada en Zipaquirá

$$C_{sr} = -14.6 + 0,6876 C_{sa}$$

Sin embargo, propuso una ecuación que muestra la eficiencia de remoción en carga superficial teniendo en cuenta el periodo de retorno:

Ecuación 15. Carga orgánica removida, en función del periodo de retención

$$C_{sr} = -256.06 + 0.75 C_{sa} + 23.53 PR$$

Además, en las lagunas facultativas se calcularon los valores de las constantes de degradación global ( $k'$ ) con base en la temperatura y de acuerdo con el modelo de cinética de primer orden. En promedio, se obtuvieron valores de 0,1 y 0,21 para ZIPA I Y ZIPA II, respectivamente. Por último, se determinó que el coeficiente ( $K_d$ ), para ZIPA II, es en promedio de 0,040; la cual se encuentra dentro de los valores recomendados en la teoría, con una media de 0,040  $d^{-1}$  (días) (Torres Carvajal, 2017).

### **2.3.5 Determinación de los coeficientes cinéticos para el diseño de lagunas de estabilización en la industria alimentaria, caso Productos Ramo S.A.**

En año 2018 dos estudiantes de la especialización en recursos hídricos de la Universidad Católica de Colombia de la ciudad de Bogotá, realizaron una investigación sobre las lagunas de estabilización son un sistema de tratamiento de agua residual de tipo biológico, que a pesar de requerir una inversión importante para su construcción tiene un bajo costo en la operación y mantenimiento. Los modelos cinéticos empleados para el diseño de lagunas de estabilización, utilizan constantes cinéticas de remoción que son afectadas por factores como temperatura, viento, lluvia, radiación solar, entre otros; los cuales afectan de manera directa la velocidad de la depuración del agua residual. Sin embargo, en Colombia no se han realizado estudios para definir constantes que se adecúen a las características climáticas y de las aguas residuales generadas, por lo que el diseño de estos sistemas se hace con coeficientes encontrados en estudios efectuados en otros países; lo anterior, puede ocasionar un mal dimensionamiento de las lagunas y un mal funcionamiento. Por esta razón, en la presente investigación se pretende determinar el funcionamiento de las lagunas que componen el sistema de tratamiento de una industria ubicada en la Sabana de Bogotá, así como determinar las constantes cinéticas de remoción ( $K$ ), para los 3 modelos de flujo que se pueden presentar. (Largo Villamizar, C. & Romero Robayo, 2018, pág. 19).

### 3. METODOLOGÍA

El objeto del presente proyecto, es calcular el coeficiente de reacción en una de las plantas de tratamiento ubicadas en el municipio de Madrid, departamento de Cundinamarca; dicha PTAR, es una serie de lagunas facultativas donde se dispone un porcentaje de las aguas que vierte el municipio; como trámite legal, se presenta la debida carta por parte de nuestra institución “Universidad Católica de Colombia” para gestionar los permisos respectivos y se comunica que se está realizando un proceso de investigación que posteriormente, se aporta al municipio.

La finalidad del proyecto es determinar el Coeficiente de Reacción por los métodos de Mezcla Completa, dicho método maneja metodologías distintas, pero conservando las variables y constantes, también se comparan con métodos teóricos (Flujo arbitrario, Vincent, Marais y Mara).

El procedimiento consiste en tomar muestras antes del ingreso a cada laguna,  $C_e$  (Concentración en el Efluente), al pasar a la siguiente laguna, el resultado del análisis obtenido será  $C_e$  de ingreso a dicha laguna (Anaerobia), así respectivamente hasta hacer la entrega al Efluente final.

El método de mezcla completa, presenta una constante  $K_t$  a una temperatura de  $35^\circ$ , este método se adopta para casi todas las PETAR en Colombia sin variar dicho coeficiente.

#### 3.1 Fases del trabajo de grado

- Fase 1: definir el tema de investigación y la recopilación de las teorías existentes, conocimientos e información en este trabajo de proyecto de grado en la especialización en recursos hídricos, en relación del tratamiento de aguas residuales por medio de lagunas de estabilización; usando como fuentes la bibliografía perteneciente a la Universidad Católica de Colombia y otras instituciones, además, en revistas y en bases de datos.

En esta fase se realizó la solicitud formal por parte de la Universidad para la realización de la investigación y se recaudó toda la información de la planta de tratamiento de interés para el proyecto; además, de establecer los parámetros a tener en cuenta al momento de recolectar las muestras y otros aspectos como el transporte, el análisis a efectuar y el lugar donde se debía realizar la caracterización del muestreo.

- Fase 2: ejecución del proyecto. Se efectuó una visita de reconocimiento a la zona de estudio, para ajustar el diseño de muestreo, luego se realizó la revisión de los diferentes métodos de diseño para lagunas, con el propósito de comparar el diseño actual y revisar la información secundaria para el análisis de los estudios acerca del sistema. Se recolectó la información primaria como son

los datos climatológicos e hidrológicos del lugar y aspectos constructivos del sistema. Posteriormente, se procedió con los muestreos de campo y el trabajo de laboratorio.

- Fase 3: análisis de resultados. Una vez obtenidos los coeficientes de remoción por diferentes métodos, se analizaron las discrepancias y semejanzas que presentaban los resultados con respecto a los hallados por otros autores; además, se establecieron las posibles causas que provocan un funcionamiento inadecuado en el sistema lagunar.

- Fase 4: conclusiones y recomendaciones. Partiendo del análisis realizado se establecieron las soluciones que se podrían emplear, para mejorar la operación y/o funcionamiento de lagunas, además de establecer que significó para el proyecto los resultados encontrados y su importancia en la especialización en recursos Hídricos de la Universidad Católica de Colombia.

## **3.2 Instrumentos o herramientas utilizadas**

### **3.2.1 Diseño experimental**

En esta investigación, se formularon hipótesis estadísticas, teniendo en cuenta el diseño del sistema y su funcionamiento, casos 1.

- Caso 1:

H0: El modelo aplicado y el comportamiento hidráulico no favorecen la remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos.

H1: El modelo aplicado y el comportamiento hidráulico si favorecen la remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos.

### **3.2.2 Variables**

Variable dependiente: La variable respuesta fue la Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO).

- Variables independientes: tiempo de retención hidráulica, temperatura del agua, tasa de aplicación superficial, concentración de la biomasa, pH.

- Variables control: se controlaron los sitios de muestreo, siendo fijos en cada sistema de lagunas: a la entrada del afluente, en el centro de cada laguna y a la salida de las mismas.

- Variables exógenas: temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y precipitación.

### **3.2.3 Diseño del muestreo**

#### **3.2.3.1 Caracterización fisicoquímica**

De acuerdo a la visita de reconocimiento a la zona de estudio, se determinó realizar 3 muestreos generales, en los cuales se ubicaron cinco estaciones de muestreo: Entrada del sistema,

salida de la laguna anaerobia, salida de la laguna facultativa 1, salida de la laguna facultativa 2 y salida total del sistema; además se consideró los centros de cada laguna, donde se tomaron muestras a tres profundidades: Superficie, medio y fondo.

Todos estos muestreos se efectuaron en los sistemas de lagunas de la PTAR del municipio de Madrid, departamento de Cundinamarca, se realizó con una duración de 12 horas. Esta información se consigna en los anexos.

### 3.2.3.2 *Ubicación de las estaciones del muestreo*

En cuanto a los muestreos generales, las estaciones se ubicaron a la entrada, en el centro (con diferentes profundidades) y a la salida de cada laguna.

### 3.2.4 **Procesamiento y análisis de la información**

Se aplicaron estimadores estadísticos de tendencia central y dispersión, tanto para las variables climáticas como las fisicoquímicas. Para el cálculo de concentraciones promedias, se utilizó la media aritmética ponderada y en algunos casos se aplicó la media geométrica.

Tabla 6. Procedimiento y análisis de las muestras

Variable	Unidad	Método	Ubicación en el sistema <sup>(2)</sup>	Referencia <sup>(1)</sup>
Temperatura ambiente	°C	Lectura directa	C	Standard Methods
Caudal	l/s	Canal vertedero	E y S	-
Temperatura del agua	°C	Lectura directa	E, C y S	Standard Methods
pH	Unidad de pH	Electrométrico	E, C y S	4500-H+-B
Oxígeno disuelto	mg/L O <sub>2</sub>	Electrométrico	E, C y S	Standard Methods
DBO <sub>5</sub> total	mg/l O <sub>2</sub>	Winkler	E, C y S	Standard Methods
DBO <sub>5</sub> sol	mg/l O <sub>2</sub>	Winkler	E y S	5210 B

Fuente: De acuerdo al Standard Methods (2002).

E, C y S significan entrada, centro y salida en cada laguna respectivamente.

Para cada variable se determinó como medidas de dispersión de datos, la varianza, la desviación estándar y el coeficiente de variación. De igual forma, se determinó el valor máximo, el valor mínimo y el rango de variación.

Con la información procesada de la forma anterior, se procedió a construir figuras de cada variable que mostrasen las diferencias en cada estación, y en los diversos tiempos establecidos, con el fin de interpretar el funcionamiento actual de las lagunas de facultativas.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Toma de muestras

Se solicita autorización a la EAAAM para realizar el proceso de recopilación de información, para lo cual se radica oficio diligenciado por la Universidad Católica de Colombia para autorizar ingreso a la PETAR Madrid 1; una vez revisado el tema con los funcionarios a cargo del área de plantas de tratamiento, se procede con recopilación de las muestras.

Tabla 7. Resultados de parámetro DBO<sub>5</sub>

<b>RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN</b>				
<b>PARAMETRO</b>	<b>DBO5 (mgO2/l)</b>	<b>DBO5 (mgO2/l)</b>	<b>DBO5 (mgO2/l)</b>	<b>DBO5 (mgO2/l)</b>
<b>FECHA TOMA</b>	<b>RIO SUBACHOQUE</b>	<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	<b>LAGUANA FACULTATIVA</b>	<b>EFLUENTE</b>
mar-19	146	132	75	70
mar-19	148	131	82	69
mar-19	165	142	86	72
nov-18	186	158	97	82
oct-18	192	168	109	90
sep-18	176	145	79	67
ago-18	182	149	88	72
jul-18	164	136	65	55
jun-18	151	129	73	60
may-18	161	139	85	70

Fuente: Propia de los autores año 2019,

Tabla 8. Dimensiones del sistema lagunar

<b>DIMENSIONAMIENTO</b>			
<b>UBICACIÓN</b>	<b>ÁREA SUPERFICIAL (m<sup>2</sup>)</b>	<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>VOLUMEN (m<sup>3</sup>)</b>
LAGUNA ANAEROBIA	5250	2	10500
LAGUNA FACULTATIVA	6000	2	12000

Fuente: EAAAM año 2018.

## 4.2 Parámetros de análisis de carga orgánica para laguna anaerobia

Tabla 9. Resultados DBO5 en muestras.

<b>RESULTADOS DE MUESTRAS TOMADAS EN AFLUENTE (RÍO) Y LAGUNA ANAEROBIA</b>		
<b>RESULTADOS DBO 5 (mg/l)</b>		
<b>No MUESTRA</b>	<b>AFLUENTE</b>	<b>LAGUNA AEROBIA</b>
1	146	132
2	148	131
3	165	142
4	186	158
5	192	168
6	176	145
7	182	149
8	164	136
9	151	129
10	161	139

Fuente: Propia de autores

El análisis que se determina es establecer la constante de remoción orgánica K (día<sup>-1</sup>), para tal efecto, se utiliza la ecuación de la DBO total.

Ecuación 16. DBO total

$$DBOt = DBOu * (1 - 10^{-kt}) \quad (16)$$

Al despejar K, tenemos

Ecuación 17. Factor K

$$K = (\log(1 - DBOt/DBOu))/(-t) \quad (16-1)$$

Se determinan las variables para satisfacer (16-1)

Donde C es la concentración de DBO a la entrada de la laguna, y

Ecuación 18. Concentración de DBO

$$COS = (Q * C) / As \quad (16-2)$$

Ecuación 19. Concentración de DBO

$$COS = (10 * d * DBOu) / \theta \quad (16-3)$$

Ecuación 20. Concentración de DBO

$$\theta = V / Q \quad (16-4)$$

Ecuación 21. Concentración de DBO

$$DBOu = (COS * \theta) / (10 * d) \quad (16-5)$$

Tabla 10. Características del sistema

CAUDAL		ÁREAS SUPERFICIAL
l/s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>2</sup>
70	6048	5250

Fuente: EAAAM.

Con los parámetros y variables ya definidos se calcula la constante de remoción K,

Tabla 11. Constante de remoción metodología experimental

CONSTANTE DE REMOCION K, METODO EXPERIMENTAL									
No MUESTRA	AFLUENTE (mgO <sub>2</sub> /l)	LAGUNA ANAEROBIA (mgO <sub>2</sub> /l)	Q(m <sup>3</sup> /d)	Θ(d)	AREA(m <sup>2</sup> )	COS(kg/Had)	DBO(U)	t(días)	K (día-1)
1	146	132	6048	1.74	5250	1681.92	584	5	0.25
2	148	131	6048	1.74	5250	1704.96	592	5	0.25
3	165	142	6048	1.74	5250	1900.8	660	5	0.25
4	186	158	6048	1.74	5250	2142.72	744	5	0.25
5	192	168	6048	1.74	5250	2211.84	768	5	0.25
6	176	145	6048	1.74	5250	2027.52	704	5	0.25
7	182	149	6048	1.74	5250	2096.64	728	5	0.25
8	164	136	6048	1.74	5250	1889.28	656	5	0.25
9	151	129	6048	1.74	5250	1739.52	604	5	0.25
10	161	139	6048	1.74	5250	1854.72	644	5	0.25

Fuente: Propia autores

La constante de remoción K, por método experimental tiene un valor correspondiente de 0.25 día-1; para establecer correlación con métodos experimentales, se utiliza la ecuación de Vincent:

Ecuación 22. Método experimental

$$C1/Co = Co / ((C1/Co) * K * \theta + 1)$$

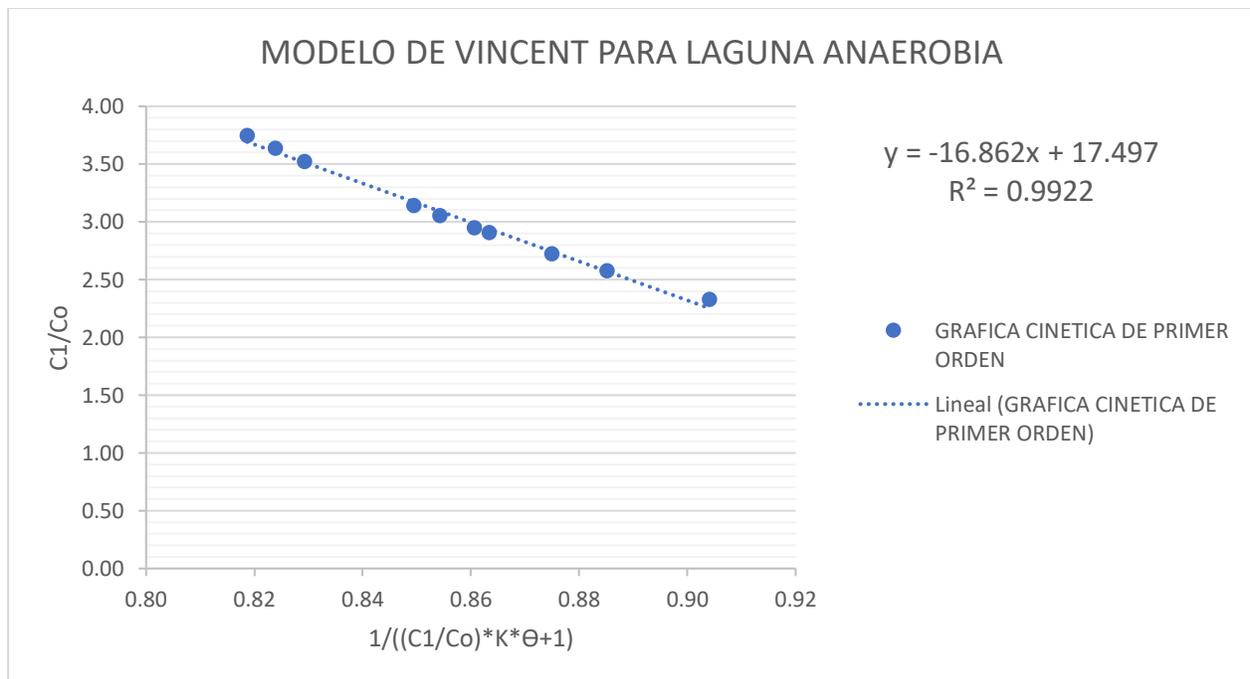
Tabla 12. Datos modelo de Vincent

MODELO DE VINCENT	
(C1/Co)	1/((C/Co) * K*θ+1)
0,90	2,33
0,89	2,58
0,86	2,95
0,85	3,14
0,88	2,72
0,82	3,63
0,82	3,75
0,83	3,52
0,85	3,05
0,86	2,90

Fuente: Propia autores

Se elabora la gráfica con los datos obtenidos:

Gráfica 1. Modelo de Vincent



Fuente: Propia autores

La tendencia de  $R^2$  tiene un valor cercano a 1, se podría insinuar que la constante de remoción K obtenida es posible de implementar para mejorar condiciones de la laguna anaerobia existente o como un posible indicador si el municipio considera mejorar el proceso de saneamiento en futuros proyectos de esta índole.

### 4.3 Método teórico de Vincent

Al despejar la constante de remoción K, de la ecuación de Vincent, obtenemos la expresión:

Ecuación 23. Constante K de la ecuación de Vincent

$$k = (C_0 / C_1) - 1 / \theta * (C_1 / C_0)^{4.8}$$

Tabla 13. Constante de remoción k método de Vincent

CONSTANTE DE REMOCIÓN K, MÉTODO DE VINCENT					
No MUESTRA	AFLUENTE (mgO <sub>2</sub> /l)	LAGUNA ANAEROBIA (mgO <sub>2</sub> /l)	$\theta$ días	n	K días-1
1	146	132	1,74	4,80	0,10
2	148	131	1,74	4,80	0,13
3	165	142	1,74	4,80	0,19
4	186	158	1,74	4,80	0,22
5	192	168	1,74	4,80	0,16
6	176	145	1,74	4,80	0,31
7	182	149	1,74	4,80	0,33
8	164	136	1,74	4,80	0,29
9	151	129	1,74	4,80	0,21

Fuente: Propia autores

La contante de remoción en promedio es de 0.213 días-1 por el método teórico de Maraiz, por el método experimental se obtiene 0.25 días-1 en promedio, generando una diferencia porcentual del 14.8%

Tabla 14. Eficiencia de remoción para lagunas anaerobia.

REMOCIÓN DE DBO EN LAGUNAS ANAEROBIAS	
Temperatura a °C	Eficiencia de Remoción de DBO en %
<10	40
11-20	50
21-25	60
>25	70

Fuente: Romero (2005).

Se determina la eficiencia de remoción en la laguna anaerobia con la expresión,

Ecuación 24. Determinación de la eficiencia de remoción

$$((C_1 - C_o) * 100) / C_1$$

Aplicando la expresión en los datos remoción,

Tabla 15. Eficiencia de remoción

<b>EFICIENCIA DE REMOCIÓN</b>		
<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>o</sub></b>	<b>% Remoción</b>
146	132	9,59
148	131	11,49
165	142	13,94
186	158	15,05
192	168	12,50
176	145	17,61
182	149	18,13
164	136	17,07
151	129	14,57
161	139	13,66

Fuente: Propia autores

La laguna anaerobia presenta un porcentaje de remoción del 14.36%.

Teniendo en cuenta el promedio de temperatura del municipio y la ubicación del sistema lagunar, el cual, se encuentra en un rango de (11 a 20) °C, se obtiene un porcentaje de remoción de 14.36%; La capacidad de remoción en lagunas anaerobias a este nivel de temperatura debe estar alrededor del 50% teniendo como parámetro en decreto 0330 de 2017; la diferencia de porcentaje se puede asociar a la profundidad de la laguna, ya que en la medición realizada se toma un dato promedio de 2m, y esta variable debe estar entre 2.4 y 5m, o bien, a la baja carga que recibe ya que su optima eficiencia se presenta con elevadas cargas de concentración.

#### 4.4 Parámetros de análisis de carga orgánica para laguna facultativa

Tabla 16. Resultados DBO5

<b>RESULTADOS DE MUESTRAS TOMADAS EN LAGUNA AEROBIA Y LAG FACULTATIVA</b>		
<b>RESULTADOS DBO 5 (mgO<sub>2</sub>/l)</b>		
<b>No MUESTRA</b>	<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	<b>FACULTATIVA</b>
1	132	75
2	135	79
3	142	77
4	158	94
5	168	106
6	145	76
7	149	85
8	136	62
9	129	70
10	139	82

Fuente: Propia autores

El método experimental, se realiza con la ecuación de Mezcla Completa

Ecuación 25. Mezcla completa

$$C = C_o / (1 + K\theta)$$

Ecuación 26. k de la ecuación de mezcla completa

$$k = (C_o / C_1 - 1) / \theta$$

Se despeja la contante de remoción K día-1,

C<sub>o</sub>: Concentración de DBO en el afluente, mg/L

C: Concentración de DBO en el efluente, mg/L

K: Constante de reacción de primer orden para remoción de DBO, días-1

θ: Tiempo de retención en el reactor, días

$$\theta = \text{Vol} / Q$$

Tabla 17. Características del sistema

CAUDAL		ÁREAS SUPERFICIAL
l/s	m <sup>3</sup> /d	m <sup>2</sup>
70	6048	6000

Fuente: Propia autores

Tabla 18. Resultados muestras laguna facultativa

<b>RESULTADOS DE MUESTRAS TOMADAS EN LAGUNA ANAEROBIA Y LAGUNA FACULTATIVA</b>						
<b>RESULTADOS DBO 5 (mg/l)</b>						
No MUESTRA	LAGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	$\theta$	$\theta$ días	K días-1	
1	132	75	171428	1,98	0,38	
2	135	79	171428	1,98	0,36	
3	142	77	171428	1,98	0,43	
4	158	97	171428	1,98	0,32	
5	168	109	171428	1,98	0,27	
6	145	79	171428	1,98	0,42	
7	149	88	171428	1,98	0,35	
8	136	65	171428	1,98	0,55	
9	129	73	171428	1,98	0,39	
10	139	85	171428	1,98	0,32	

Fuente: Propia autores

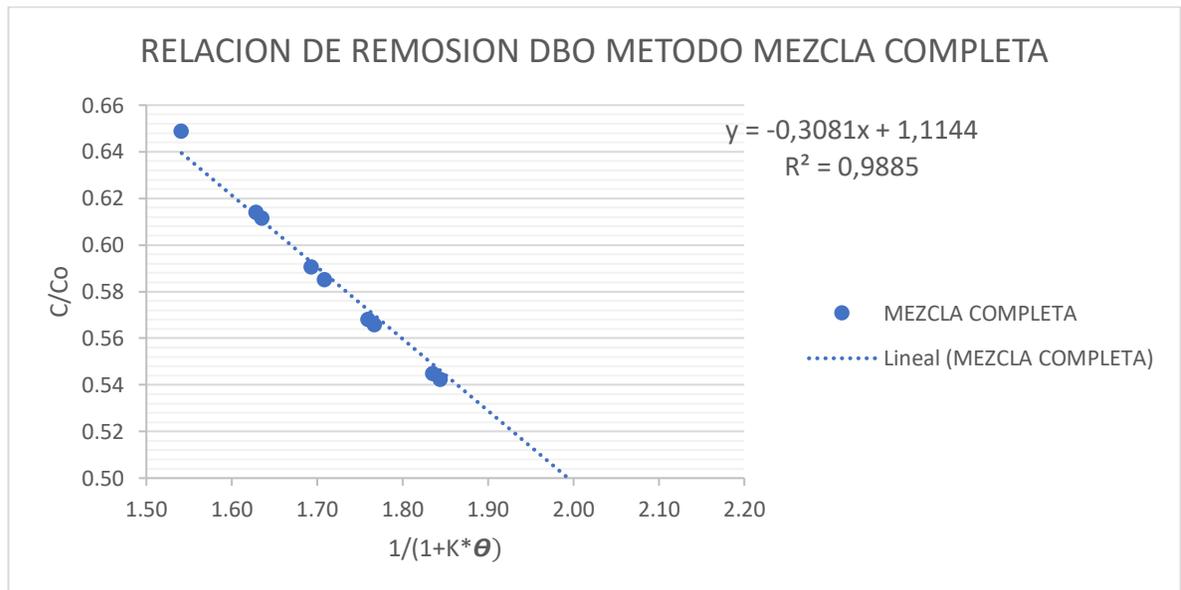
Se obtiene una K promedio de 0.378 día-1. Con el valor de k, se determina correlación con la expresión  $C/Co=1/(1+K*\Theta)$  aplicando el método teórico de Mezcla Completa.

Tabla 19. Remoción de DBO método de mezcla completa

<b>REMOCIÓN DE DBO POR MÉTODO MEZCLA COMPLETA</b>	
<b>C/Co</b>	<b>1/(1+K*θ)</b>
1,76	0,57
1,71	0,59
1,84	0,54
1,63	0,61
1,54	0,65
1,84	0,54
1,69	0,59
2,09	0,48
1,77	0,57
1,64	0,61

Fuente: Propia autores

Gráfica 2. Relación de remoción DBO método Maraiz



Fuente: Propia autores

La relación  $C/Co$  con la ecuación de Marais muestra una tendencia aproximada a 1, lo que permite sugerir que la constante de remoción  $K$  obtenida es posible de utilizar en diseños de Lagunas facultativas si se quiere mejorar la existente o proyectar otro sistema lagunar en condiciones muy similares a las del presente análisis por parte de la empresa prestadora del servicio.

#### 4.5 Métodos teóricos

Algunos de los métodos teóricos para correlacionar el método experimental, son Marais y Mara los cuales están relacionados directamente con la temperatura, donde

Marais se representa  $kt = 1.2 * 1.085^{t-35}$

Mara se representa  $kt = 0,3 * 1,05^{(t-20)}$

Tabla 20. Constante k métodos de Marais y Vincent

<b>CONSTANTE DE REMOCIÓN K, MÉTODOS TEÓRICOS MARAIS Y VINCENT</b>						
<b>No MUESTRA</b>	<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	<b>LAGUNA FACUTATIVA</b>	<b>Ø días</b>	<b>T(°C)</b>	<b>K Teórico Marais (d<sup>-1</sup>)</b>	<b>K Teórico Mara (d<sup>-1</sup>)</b>
1	132	75	1.98	20	0.353	0.353
2	79	79	1.98	20	0.353	0.353
3	77	77	1.98	20	0.353	0.353
1	158	97	1.98	20	0.353	0.353
1	168	109	1.98	20	0.353	0.353
1	145	79	1.98	20	0.353	0.353
1	149	88	1.98	20	0.353	0.353
1	136	65	1.98	20	0.353	0.353
1	129	73	1.98	20	0.353	0.353
1	139	85	1.98	20	0.353	0.353

Fuente: Propia autores

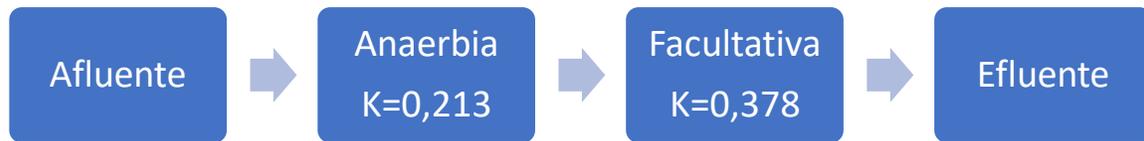
Tabla 21. Eficiencia de remoción laguna facultativa

<b>EFICIENCIA DE REMOCIÓN</b>		
<b>C<sub>1</sub>(mgO<sub>2</sub>/l)</b>	<b>Co (mgO<sub>2</sub>/l)</b>	<b>% Remoción</b>
132	75	43,18
135	79	41,48
142	77	45,77
158	124	38,61
168	136	35,12
145	106	45,52
149	115	40,94
136	65	52,21
129	100	43,41
139	85	38,85

Fuente: Propia autores

La laguna facultativa presenta un porcentaje de remoción del 42.5%, el cual es bajo con base en lo indicado por el decreto 0330 de 2017, y que debe estar en un 80%.

*Imagen 1: Diagrama del sistema resultados K*



Fuente: propia de los autores

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados en la Eficiencia de remoción de DBO en el sistema lagunar y tomando como marco de referencia legal el decreto 0330, donde se indica que para lagunas Anaerobias el porcentaje de remoción como mínimo es del 50% y en facultativas el 80%; como indicamos, se puede aducir que es por la baja carga que recibe la laguna Anaerobia ya que está diseñada para remover grandes cargas contaminantes y afecta el tratamiento que realiza la laguna facultativa; o puede ser la profundidad de las mismas, que no se encuentran en los parámetros de diseño.

Tabla 22. Resultados de muestras PTAR

<b>RESULTADOS DE CARACTERIZACIÓN</b>				
<b>PARAMETRO</b>	<b>DBO5 (mgO<sub>2</sub>/l)</b>	<b>DBO5 (mgO<sub>2</sub>/l)</b>	<b>DBO5 (mgO<sub>2</sub>/l)</b>	<b>DBO5 (mgO<sub>2</sub>/l)</b>
<b>FECHA TOMA</b>	<b>RIO SUBACHOQUE</b>	<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	<b>LAGUANA FACULTATIVA</b>	<b>EFLUENTE</b>
mar-19	146	132	75	70
mar-19	148	131	82	69
mar-19	165	142	86	72
nov-18	186	158	97	82
oct-18	192	168	109	90
sep-18	176	145	79	67
ago-18	182	149	88	72
jul-18	164	136	65	55
jun-18	151	129	73	60
may-18	161	139	85	70

Fuente: Propia autores

Se puede sugerir que el funcionamiento de la Laguna Anaerobia presenta falencias, teniendo en cuenta que esta, es la encargada del proceso primario en el sistema lagunar y que repercute directamente en la remoción que debe realizar la laguna facultativa; a su vez, esta presenta mejores resultados en su eficiencia, pero sin llegar al porcentaje esperado.

Tabla 23. Rangos de eficiencia en los procesos de tratamiento

	Unidades de tratamiento	Eficiencia mínima de remoción de parámetros, porcentajes (%)						
		DBO5	DQO	SST	SSED	Grasas y aceites	Patógenos	Observaciones
Pre-tratamiento	Cribado o desbaste	0-15	0-10	10-50	0-6	0-40	N/A	Remociones con militamices y microcribas
	Desarenadores	0-5	0-5	0-10	N/A	N/A	N/A	
	Trampa de grasas	0-5	0-3	10-15	N/A	85-95	N/A	
Tratamiento Primario	Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	75-85	60-70	30-50	
	Lagunas anaerobias	50-70	30-50	50-60	75-85	80-90	80-90	
	Tanque Imhoff	25-40	15-30	50-70	75-85	60-70	-30-50	
Tratamiento Secundario	Reactor UASB (RAFA)	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Lagunas facultativas	80-90	40-50	63-75	75-85	70-90	80-90	Sin contar con algas
	Lagunas aireadas	80-95	60-70	N/A	N/A	N/A	80-90	Con sedimentación secundaria
	Reactor anaerobio RAP	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	N/A	N/A	20-40	
	Lodos activados (convencionales)	80-95	70-80	80-90	N/A	N/A	80-90	
	Filtros percoladores De alta tasa, roca De alta tasa, plástico	65-90 75-95	55-70 60-80	60-85 65-85	N/A N/A	N/A N/A	80-90 80-90	
Desinfección	Rayos UV	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	
	Cloración	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	100	
	Laguna de maduración	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	99,99	

Fuente: Decreto 0330 de 2017.

En cuanto al tiempo de retención hidráulica, este tiene relación directa con la relación de diseño Volumen y Caudal; y se determina por la expresión  $\theta = \text{Vol}/Q$ , siendo 1.73 días para la laguna anaerobia y 1.98 días en la laguna facultativa.

Este criterio se evidencia directamente en el alto caudal  $Q$  que ingresa al sistema por los variables anteriormente descritas, Para el análisis de la constante de remoción  $K$ , se hace una correlación directa entre la carga contaminante DBO5, se determinan ecuaciones para los dos tipos de lagunas que conforman el sistema mediante método experimental, donde se obtienen ecuaciones con una correlación con tendencia a (1) uno y son comparadas con los métodos teóricos.

Tabla 24. Ecuación laguna facultativa y anaerobia

<b>LAGUNA FACULTATIVA</b>	
<b>METODO TEORICO</b>	<b>METODO DE MARAIZ</b>
$Y=-0.3081X+1.1144$	
$R^2=0.985$	
<b>LAGUNA ANAEROBIA</b>	
<b>METODO TEORICO</b>	<b>METODO DE VINCENT</b>
$Y=-16.862+17.497$	
$R^2=0.9922$	

Fuente: Propia autores

La laguna anaerobia trata un caudal promedio de 70 lt/s., una carga contaminante diaria de 1.016 TN/m<sup>3</sup>.día (flujo másico), presenta una eficiencia de remoción de DBO de 17.36%, se determinó una constante cinética de remoción de carga orgánica (K) igual a 0.249 d<sup>-1</sup> (días), y bajo el método teórico de Vincent con K=0.2135 d<sup>-1</sup> (días), bajo las condiciones de operación especificadas en las tablas números. 17 y 29 respectivamente. Se obtuvo un tiempo de retención hidráulica de 1.98 días.

Para la laguna Facultativa, se obtuvo un tiempo de retención hidráulico de 1.74 días; en esta laguna se presenta remoción de carga orgánica del 42.5%. Por otro lado, en las constantes cinéticas encontradas bajo la ecuación de DBOUC, K=0.249 d<sup>-1</sup> (días), correlacionado con el método de Mezcla completa. (Tabla 18) y por los métodos teóricos de Marais y Mara se obtuvo un K=0.353 d<sup>-1</sup> (días).

Tabla 25. Variación de K con la temperatura

Variación de Temperatura	$K_t=1.2(1.085)^{(t-35)}$	$K_t=0.3*(1.05)^{(T-20)}$
<b>T(°C)</b>	<b>K Teórico Marais</b>	<b>K Teórico Mara</b>
20	0.353	0.3000
19	0.325	0.2857
18	0.300	0.2721
17	0.276	0.2592
16	0.255	0.2468
15	0.235	0.2351
14	0.216	0.2239
13	0.199	0.2132
12	0.184	0.2031
11	0.169	0.1934
10	0.156	0.1842

Fuente: Propia autores

Tabla 26. Porcentaje diferencia método teórico y experimenta

Variación T(°C)	K teórico de Marais $K_t=1.2(1.085)^{(t-35)}$	K teórico de Mara $K_t=0.3*(1.05)^{(T-20)}$	K Experimental A temperatura promedio de 16°c	% de diferencia Marais	% de diferencia Mara
20	0.35	0.30			
19	0.33	0.29			
18	0.30	0.27			
17	0.28	0.26			
16	0.25	0.25	0.3783	32.68	34.76
15	0.23	0.24			
14	0.22	0.22			
13	0.20	0.21			
12	0.18	0.20			
11	0.17	0.19			
10	0.16	0.18			

Fuente: Propia autores

Tabla 27. Comparativo proyecto Zipa 1

ESPECIFICACIONES	ZIPA 1		MADRID 1	
	LUGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA	LUGUNA ANAEROBIA	LAGUNA FACULTATIVA
AREA SUPERFICIAL (m2)	9200	58500	5250	6000
VOLUMEN (m3)	26000	156000	10500	12000
CAUDAL (l/s)	132	132	70	70
TIEMPO DE RETENCION (día)	6.84	2.16	1.73	1.98
K (día-1)	0.17	0.21	0.25	0.378

Fuente: Propia autores

## 6. CONCLUSIONES

La planta de tratamiento maneja un caudal de 70 l/s, y una carga orgánica desde el afluente de 143 mg/l de acuerdo a los resultados de los ensayos recopilados; las características de remoción por diseño son de 70.38 mg/l; se aprecia un incremento de carga del 49%.

Para el análisis de la constante de remoción (K), se hace una correlación directa entre la DBO5 (Carga aplicada) y sus variables; se determinan ecuaciones para los dos tipos de laguna empleando métodos experimentales y teóricos mostrando una tendencia  $R^2$  aproximada a 1, para el caso específico, las correlaciones derivadas de la ecuación poseen una tendencia a las determinadas teóricamente por autores como Vincent en la laguna anaerobia y mezcla completa, Marais, Mara en la laguna facultativa.

La eficiencia de la capacidad de remoción de la constante (K), se determina de acuerdo a la temperatura, así mismo de las variables Caudal (Q), Volumen (Vol), y profundidad, para las cuales se diseña el sistema lagunar de remoción de la carga Orgánica; incrementar esta capacidad, genera una baja en el tratamiento y las entregas en los Efluentes y esta no será la indicada por los organismos de control.

Las constantes halladas son menores a las encontradas mediante las ecuaciones de los autores previamente mencionados, con lo que se demuestra que los valores de los coeficientes cinéticos (K), difieren en comparación con los que se usan actualmente, y que fueron determinados con estudios realizados en zonas con climas diferentes a los que se presenta en el municipio de Madrid, Cundinamarca Colombia, sin embargo, diferentes autores toman como base de diseño 20°C de temperatura. (Romero)

La variación de la constante de remoción K, con respecto a la temperatura es directamente proporcional dado que, a menor temperatura, la constante de remoción también toma esta tendencia; en promedio la temperatura en la toma de las muestras es de 16°C presentando un porcentaje de diferencia con respecto a Marais de 32.68% y a Mara de 34.76%.

Tomando como punto de referencia un proyecto de grado realizados en la universidad católica de Colombia en el municipio de Zipaquirá, es posible hacer un comparativo dado que los parámetros de temperatura, pluviosidad, entre otros tienen semejanzas, y la finalidad del este trabajo de grado es el análisis de la constante de remoción K, y su posible viabilidad para utilizar los resultados en diferentes zonas de la región, para el caso se aprecia que el dimensionamiento en área, volumen son mayores en Zipa 1, el Caudal es 47% mayor, el tiempo de retención para cada

una de las lagunas también los supera; y es evidente por los datos de caudal y volumen; la constante de remoción para lagunas anaerobias y facultativas son mayores en Madrid.

El porcentaje de materia orgánica removida desde la toma de muestra en el afluente, durante el proceso de oxidación en el sistema hasta la entrega en el efluente es de 58.41% en el sistema analizado Madrid I.

Puede sugerirse que las constantes de remoción K, calculadas experimentalmente, sean utilizadas en procesos de mejoramiento en el sistema existente, o en caso de ampliación de la capacidad de saneamiento del municipio si a futuro proyecta plantas con estas características; por otro lado, estimar que estas constantes puedan ser aplicadas en diseños para plantas a otros municipios de la sabana con características similares es muy arriesgado, y se sugiere hacer estudios en estos posibles lugares para obtener información que permita consolidar información para establecer modelos.

## 7. RECOMENDACIONES

Los sistemas lagunares son estructuras abiertas al sol y al aire con el fin de lograr un tratamiento de las aguas residuales mediante procesos naturales.

Un posible alcance descontaminante antes del ingreso a los sistemas lagunares, es manejar los procesos de vertimientos legales y concertar los ilegales determinado la capacidad de asimilar los contaminantes por parte del río, sin embargo, se debe tener en cuenta que los cuerpos hídricos destinados para estas captaciones vienen con alta carga desde municipios o vertimientos generados aguas arriba de la cabecera municipal objeto de este estudio.

Las lagunas de estabilización, como se indica, son un método simple de tratamiento y a la vez económico; es por esta razón que los municipios de la sabana y en general implementan este método de saneamiento; sin embargo se debe adoptar planes por parte de las empresas prestadoras de servicios públicos en concordancia con los planes maestro contemplados por el municipio, para implementar una correcta disposición de los residuos generados de carácter doméstico, industrial e institucional, en tal forma que se optimice la capacidad de las plantas de tratamiento.

El mantenimiento que se debe implementar en estos sistemas es importante, ya que al conservar las condiciones de diseño como el volumen y altura benefician procesos fotosintéticos, que son de beneficio para las algas y microorganismos los cuales efectúan el proceso de remoción.

Las variables de profundidad y volumen, se ven afectadas por exceso de materia orgánica no cribada o seleccionada antes del ingreso al sistema, demandando mayor eficiencia al sistema para el cual no ha sido diseñado.

Un problema que se presenta al diseñar lagunas de estabilización, es la determinación del valor correcto de las constantes cinéticas a utilizar, ya que este valor es afectado por parámetros ambientales y de carga orgánica. Por lo que no es posible recomendar un valor general, la tendencia es determinar estos valores en forma regional y generar ecuaciones de diseño en función de los parámetros que más le afecten. En este trabajo se determinaron las constantes cinéticas de carga orgánica (K), en un sistema lagunar ubicado en el municipio de Madrid, Cundinamarca. El sistema está integrado por 2 lagunas en: anaerobia, facultativa con tiempos de retención hidráulica (TRH) de días respectivamente. El agua residual a tratar es de tipo domestica municipal con descargas de la zona industrial.

Se recomienda efectuar muestreos compuestos en diferentes momentos del año con el fin de que estos sean representativos de las condiciones climáticas y así, tener coeficientes que se

ajusten más a la realidad de las lagunas facultativas; además de un mejor ajuste de la gráfica de carga orgánica volumétrica para lagunas anaerobias.

Se aconseja establecer ecuaciones para determinar los coeficientes de reacción, que involucren la temperatura, cargas orgánicas, tiempo de retención, profundidad y radiación solar; debido a que dichos factores influyen significativamente el valor de la constante.

**REFERENCIAS**

- Ellis, K. & Rodrigues, C. (1993). Verification of two design approaches for stabilization ponds. *Water Research*, 1447-1454.
- La Iglesia Gandarillas, J. (2016). Lagunaje: módulo gestión de aguas residuales y reutilización. Recuperado de file:///D:/JH/Civil/RecHid-Mauricio-Charry/lagunaje\_magua\_2016.pdf
- Morgan, J. (2010). Modelos en plantas de tratamiento de aguas residuales a través de procesos biológicos. Recuperado de [http://www.cerpis.org\\_bvsaid/impactos/mexico/R-0032.pdf](http://www.cerpis.org_bvsaid/impactos/mexico/R-0032.pdf)
- Lizarazo Becerra, J. M. & Orjuela Gutiérrez, M. I. (2013). Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia. Recuperado de [www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/11112/1/marthaisabelorjuela2013.pdf)
- Romero, J. A. (2005). Lagunas de estabilización de aguas residuales. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieros.
- Soares, S. B. (2001). Reaction coefficient (K) evaluation for full-scale facultative pond systems. *Bioresource Technology*, 78, 99-102.
- Torres, J. S. (1999). Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond. *Hydraulic performance of a deep wastewater estabilización pond*, 31, 679-688.
- Universidad Católica de Colombia. (22 de junio de 2016). Acuerdo 242. Recuperado de <https://www.ucatolica.edu.co>
- Vitako, T. G. (1984). Guía para el manejo de lagunas de estabilización.

### Anexo A. Registro fotográfico

Registro fotográfico 1. Río Subachoque al ingreso del sistema



Registro fotográfico 2. Estructura de cribado y aforado al ingreso del sistema



Registro fotográfico 3. Laguna Anaerobia



Registro fotográfico 4. Laguna facultativa



Registro fotográfico 5. Tubería conducción hacia entrega efluente



Registro fotográfico 6. Entrega al río Subachoque







## Reportes de laboratorio 3. Primer muestreo: 45911-3



**INFORME DE LABORATORIO 45911**

**No. DE MUESTRA: 45911-3**  
BOGOTÁ, D.C. 5 DE ABRIL DEL 2019

**MAURICIO CHARRY.**  
ATN:

BOGOTÁ, CUNDINAMARCA  
PROYECTO: ANÁLISIS LAGUNA OXIDACIÓN Y FACULTATIVO

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: LAGUNA FACULTATIVA

FECHA Y HORA DE MUESTREO: 20/03/19 18:30      MATRIZ: OTRO  
 PROCEDENCIA: MADRID - CUNDINAMARCA      FECHA RECEPCION: 21/03/19  
 MUESTREO REALIZADO POR: MAURICIO CHARRY.      TIPO DE MUESTREO:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	FECHA / ANALISTA
<b>FISICO QUIMICOS</b>					
SI	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO DBO5	S.M 5210B Mod - SM 502 O-G	mg O2/L	75	21/03/19 / SPO
SI	PH	S.M 4300 H+ B	Unidades de pH	7.85	21/03/19 / SPO
SI	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	S.M 2540 D	mg/L	130	20/03/19 / XBB

**OBSERVACIONES**

Ninguna

Este informe no podrá ser reproducido sin la autorización escrita de Daphnia Ltda. Resultados válidos únicamente para la muestra analizada.

<b>ACREDITACIÓN DE LABORATORIO (AA)</b>	
IDEAM - Res. 1720 Agosto 2016. IDEAM - Res. 1456 y 1457 Julio de 2017 Ministerio de salud y protección social. Autorización para realizar análisis físico-químicos y microbiológicos al agua para consumo humano. Programa PCCOM	<b>Daphnia Ltda.</b> <b>DANILO RUAÑO ARANGUREN</b> <b>JEFE DE LABORATORIO - PQ 1480</b>

Página 1 de 1

Carretera 42B No.14-60 Bogotá D.C. - Colombia PBX: 3906779 - 4058109 E-MAIL: daphnia@daphnia Ltda. com MT.800.213.470-5  
 TL-02-117 03-02-19 Rev. 3

## Reportes de laboratorio 4. Primer muestreo: 45911-4



**INFORME DE LABORATORIO 45911**

**No. DE MUESTRA: 45911-4**  
BOGOTÁ, D.C. 5 DE ABRIL DEL 2019

**MAURICIO CHARRY.**  
ATN:.

BOGOTÁ, CUNDINAMARCA  
PROYECTO: ANÁLISIS LAGUNA OXIDACIÓN Y FACULTATIVO

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA: LAGUNA FACULTATIVA 2

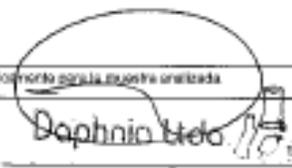
FECHA Y HORA DE MUESTREO: 20/03/19 16:30      MATRIZ: OTRO  
PROCEDENCIA: MADRID - CUNDINAMARCA      FECHA RECEPCIÓN: 21/03/19  
MUESTREO REALIZADO POR: MAURICIO CHARRY.      TIPO DE MUESTREO:

AA	PARAMETRO	METODO ANALITICO	UNIDADES	RESULTADO	FECHA / ANALISTA
<b>FISICO QUIMICOS</b>					
SI	DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO DBO5	S.M 8210B Mod - 8M4590 O-G	mg O2/L	70	21/03/19 / SPO
SI	pH	S.M 4500 H+ B	Unidades de pH	6,77	21/03/19 / SPO
SI	SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	S.M 2540 D	mg/L	60	26/03/19 / XSB

**OBSERVACIONES**

Ninguna

Este informe no podrá ser reproducido sin la autorización escrita de Daphnia Ltda. Resultados válidos únicamente para la muestra analizada.

<p style="text-align: center;"><b>ACREDITACIÓN DE LABORATORIO (AA)</b></p> <p>IDEAM - Res. 1725 Agosto 2015.      IDEAM - Res. 2026 Diciembre 2016.          IDCAM - Res. 1466 y 1467 Julio de 2017.      IDEAM - Res. 1590 Agosto 2017.          IDEAM - Res. 2492 Octubre 2018.</p> <p>Ministerio de salud y protección social. Autorización para recibir órdenes técnicas físicas y microbiológicas al agua para consumo humano. Programa POCAP</p>	 <p style="text-align: center;"><b>DAPHNIA LTDA.</b></p> <p style="text-align: center;"><b>DANILO RIANO ARANGUREN</b> JEFE DE LABORATORIO - PQ 1486</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Página 1 de 1

Carretera 42B No. 14-60 Bogotá D.C. - Colombia PBX: 3956778 + 4058159 E-MAIL: daphnia@daphnia Ltda. com NIT: 800.213.470-5  
 TL-02-117 03-02-16 Rev. 3