



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA,
BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE
AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN
MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA**

Krystel Marisol Monroy Mahecha

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, mayo de 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS
(BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A
UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA
EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN
EXTENDIDA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR:

KRYSTEL MARISOL MONROY MAHECHA
ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal I	Inga. Glenda Patricia García Soria
Vocal II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
Vocal III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
Vocal IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
Vocal V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
Secretaria	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

Decano	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Examinador	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
Examinador	Inga. Lorena Victoria Pineda Cabrera
Examinador	Ing. Jaime Domingo Carranza González
Secretaria	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 5 de agosto de 2009.



Krystel Marisol Monroy Mahecha



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 19 de octubre de 2009

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

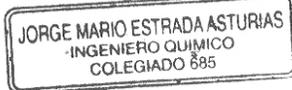
Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el **INFORME FINAL** de Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.) titulado: **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA, Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA"** desarrollado por la estudiante de Ingeniería Química **KRYSTEL MARISOL MONROY MAHECHA**, con carné No. **2004-12510**.

Por lo cual, después de haber realizado la revisión del respectivo informe final y de haberle hecho las correcciones pertinentes, considero que llena los requisitos para su aprobación.

Atentamente,

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
Asesor Técnico
No. Colegiado 685



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 12 de febrero de 2010.
Ref.EPS.D.119.02.10.

Ing. Williams G. Alvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Alvarez Mejía.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria **Krystel Marisol Monroy Mahecha**, quien fue debidamente asesorada y supervisada por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte de la Asesora -Supervisora de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zecena de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra



Edificio E.P.S., Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala,
Ciudad Universitaria zona 12, tel. (502) 2442-3509



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Guatemala, 09 de abril de 2010
Ref.EIQ.109.2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta **EPS-30-10-B-IF** le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del Ejercicio Profesional Supervisado -EPS-, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **KRYSTEL MARISOL MONROY MAHECHA** identificada con carné No. **2004-12510**, titulado "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA", el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Químico Jorge Mario Estrada Asturias, asesorado-supervisado de EPS por la Ingeniera Lorena Victoria Pineda Cabrera, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Monroy Mahecha** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la facultad para su autorización e impresión.

"Id y Enseñad a Todos"

Inga. Teresa Lisey de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

Cc. Archivo
TLDLA/am

71^{va} Formando Ingenieros Químicos en Guatemala

PROGRAMA DE INGENIERÍA
QUÍMICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Periodo 2009 - 2012





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.

Ref.EIQ.TG.053.2010

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS final) de la estudiante **KRYSTEL MARISOL MONROY MAHECHA** titulado: **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.


Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía, MIQ; MPISC
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, mayo de 2010



Cc: Archivo
WGAM/am

71 ^{años} FORMANDO INGENIEROS QUÍMICOS EN GUATEMALA

PROGRAMA DE INGENIERÍA
QUÍMICA ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Periodo 2009 - 2012



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 180.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS TÉCNICAS AERÓBICAS (BURBUJA FINA, BURBUJA GRUESA Y AIREADOR VENTURI JET) A UTILIZAR EN EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMICILIAR PARA EL SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS EN MODALIDAD DE AIREACIÓN EXTENDIDA**, presentado por la estudiante universitaria **Krystel Marisol Monroy Mahecha**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, mayo de 2010



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios: Por darme la fortaleza, paciencia y sabiduría para alcanzar ésta meta.
- Mis padres: Mario Monroy y Maritza Mahecha, por darme la vida y ser excelentes ejemplos a seguir. Por ser siempre un apoyo incondicional, aconsejarme, guiarme y enseñarme a luchar por mis sueños.
- Mis hermanos: Felipe, Lindsay y familia, por siempre alentarme a seguir adelante.
- Mis sobrinas: Por ser chispitas de alegría en mi vida.
- Mis tíos, primos y demás familia: Por estar siempre al pendiente de mí y exhortarme a seguir adelante.
- Mis amigos y amigas: A cada uno de ellos, por ser personas tan especiales y estar siempre a mi lado en todo momento. Por regalarme infinitos momentos de alegría y enseñarme el valioso significado de una verdadera amistad.
- Mi novio: Maco, por su apoyo incondicional en todo momento, paciencia y comprensión.

Mis asesores: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias e Inga. Lorena Victoria
Pineda Cabrera, por su apoyo y asesoría.

Empresa en la que Por darme la oportunidad de llevar a cabo dicho proyecto.
se desarrolló el
proyecto:

DEDICATORIA

A Dios y a mis padres, por todo el apoyo que me han brindado. Éste triunfo también es de ustedes.

Papi, aunque Dios te haya llevado tan pronto con él, espero que donde quiera que estés, compartas este logro conmigo. Gracias por todo tu esfuerzo. Desde tu partida, Mami ha fungido como madre y padre; lo ha hecho y lo seguirá haciendo muy bien. Te agradezco Mami, por todo tu amor, apoyo y por alentarme a seguir adelante a pesar de las adversidades. Con esto les digo, meta alcanzada.

Me siento muy orgullosa de tener padres como ustedes.

LOS AMO.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
ABSTRACT	XVIII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Aguas residuales	3
2.1.1 Constituyentes	3
2.1.2 Métodos analíticos	5
2.1.3 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales	6
2.1.3.1 Sólidos totales	6
2.1.3.2 Materia orgánica	6
2.1.3.3 Materia inorgánica	7
2.1.3.4 Gases	8
2.1.3.5 Microorganismos	8
2.1.3.5.1 Crecimiento bacteriano	9

2.1.3.5.2 Crecimiento en términos de masa bacteriana	9
2.1.3.5.3 Crecimiento celular	11
2.2 Tratamiento de las aguas residuales	11
2.2.1 Métodos de tratamiento de las aguas residuales	12
2.2.2 Procesos que intervienen en el tratamiento de aguas residuales	14
2.2.2.1 Operaciones físicas Unitarias	14
2.2.2.2 Procesos químicos unitarios	15
2.2.2.3 Procesos biológicos unitarios	15
2.3 Sistemas de tratamiento secundario aeróbicos	16
2.3.1 Sistemas de tratamiento por lodos activados	17
2.3.2 Sistema de lodos activados con aireación extendida	20
2.4 Aireación	20
2.4.1 Sistemas de aireación	21
2.4.1.1 Difusores de aire y su clasificación	21
2.4.1.2 Aireadores mecánicos y su clasificación	23
2.4.1.2.1 Principio de funcionamiento del aireador Venturi Jet	24
3. DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1 Delimitación de campo de estudio	27
3.2 Recursos humanos disponibles	29
3.3 Recursos materiales disponibles	29
3.4 Técnicas cualitativas y cuantitativas	31
3.5 Recolección y ordenamiento de la información	34
3.6 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	42

3.6.1 Muestra de cálculo	42
3.6.2 Presentación de resultados	46
3.7 Análisis estadístico	51
4. RESULTADOS	61
5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	67
6. LOGROS OBTENIDOS	77
CONCLUSIONES	79
RECOMENDACIONES	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
BIBLIOGRAFÍA	85
APÉNDICE	87
ANEXOS	89
ANEXO 1. Tabla de requisitos académicos	91
ANEXO 2. Diagrama de Ishikawa	92
ANEXO 3. Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Curva característica de crecimiento bacteriano en términos del registro de la masa de los organismos	10
2	Diagrama de lodos activados convencionales	17
3	Diagrama de lodos activados con aireación extendida	20
4	Aireador Venturi Jet	24
5	Posición de los dispositivos de aireación dentro del tanque de aireación para cada PTAR	28

TABLAS

I	Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual	4
II	Recursos materiales disponibles	30
III	Orden de visita a cada PTAR en el día	32
IV	Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de burbuja fina	36
V	Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de burbuja fina	37
VI	Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de burbuja gruesa	38
VII	Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de burbuja gruesa	39

VIII Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de Venturi Jet	40
IX Valores de parámetros FQ sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de Venturi Jet	41
X Porcentaje de remoción de los parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de BF	46
XI Porcentaje de remoción de los parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de BG	47
XII Porcentaje de remoción de los parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de VJ	48
XIII Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de burbuja fina	49
XIV Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de burbuja gruesa	49
XV Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de Venturi Jet	50
XVI Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de BF	52
XVII Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de BG	53
XVIII Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros FQ sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de VJ	53
XIX Análisis estadístico para valores de porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) en el tanque de aireación	54

XX	Tabla de ANOVA	56
XXI	Valores de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) para cada planta de tratamiento	58
XXII	Tabla de ANOVA para ejemplo 3	59
XXIII	Promedio de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos en la salida del proceso para PTAR de BF	61
XXIV	Promedio de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos en la salida del proceso para PTAR de BG	62
XXV	Promedio de remoción de los principales parámetros FQ en la salida del proceso para PTAR con aireador VJ	63
XXVI	Eficiencia de la transferencia de oxígeno promedio en el tanque de aireación	64
XXVII	Comparación de las técnicas aeróbicas en estudio	65

LISTA DE SÍMBOLOS

AR	Agua residual
BF	Burbuja fina
BG	Burbuja gruesa
Cs	Saturación de oxígeno en agua a cierta temperatura (mg/l)
Cw	Concentración de oxígeno en el proceso de agua residual (tanque de aireación) (mg/l)
D_e	Valor de entrada del parámetro en estudio, a la unidad de tratamiento
D_s	Valor de salida del parámetro en estudio, de la unidad de tratamiento
DBO₅	Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/l)
DQO	Demanda Química de Oxígeno (mg/l)
EPDM	Caucho etileno-propileno-dieno
f	Relación de los dos cuadrados medios (tabla de ANOVA)
FQ	Fisicoquímicos
gl	Grados de libertad
Ha	Hipótesis alterna
Ho	Hipótesis nula
I	Número de muestras
J	Número de observaciones en cada muestra
kg O₂/ kW·h	Transferencia de oxígeno estándar
MSTr	Cuadrado medio de tratamientos
MSE	Cuadrado medio de error

N	Número total de valores
NTK	Nitrógeno total de Kjeldahl (mg/l)
OD	Oxígeno disuelto (mg/l)
OTR	Tasa de transferencia de oxígeno con el sistema de aireación actual (kg O ₂ /d)
P	Potencia total utilizada en el sistema de aireación (kW)
pH	Potencial de hidrógeno
PTAR	Planta de tratamiento de agua residual
Q	Caudal (m ³ /d)
Q_{α,I,I(J-1)}	Valor crítico α del extremo superior de la distribución de intervalo estudentizado con I grados de libertad en el numerador y I(J-1) grados de libertad en el denominador
Q_{ex}	Caudal extraído (m ³ /d)
Q_r	Caudal de retorno (m ³ /d)
r_g	Tasa de crecimiento bacteriano, masa/unidad de volumen· tiempo
S_o	DBO ₅ del afluente (entrada) (mg/l)
S	DBO ₅ del efluente (salida) (mg/l)
SOTE	Eficiencia estándar de la transferencia de oxígeno (%)
SOTR	Tasa de transferencia de oxígeno estándar en el sistema de aireación instalado (kg O ₂ /d)
SSE	Suma de cuadrados del error
S. Dis.	Sólidos disueltos (mg/l)
S. Sed.	Sólidos sedimentables (mg/l)
S. Susp.	Sólido suspendidos (mg/l)
S. Totales	Sólidos totales (mg/l)
SST	Suma total de cuadrados
SSTr	Suma de cuadrados del tratamiento

T	Temperatura (°C,°F,K)
TA	Tanque de aireación
VJ	Venturi Jet
X	Concentración de sólidos suspendidos (mg/l)
X_o	Concentración de sólidos suspendidos en la entrada (mg/l)
X_e	Concentración de sólidos suspendidos en la salida (mg/l)
X_r	Concentración de sólidos suspendidos en el retorno (mg/l)
\bar{X}	Media aritmética
x..	Suma de todas las x _{ij} (el gran total)
x_i	Suma de las x _{ij} para i fija
X_i	Valores de las variables

Letras griegas

α	Factor de corrección de transferencia de oxígeno (adimensional)
μ	Tasa específica de crecimiento de las células(tiempo ⁻¹)
Σ	Sumatoria
σ	Desviación estándar
σ^2	Varianza

GLOSARIO

Afluente	El agua captada por un ente generador.
Aguas residuales	Las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.
Aguas residuales domiciliarias	Las aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.
Ávidas	Las bacterias que se encuentran en el tanque de aireación sienten un deseo fuerte e intenso de obtener alimento.
Caracterización de una muestra	La determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.
Clarificador o sedimentador secundario	Es el tanque en el cual se separan los lodos activados del líquido mezcla, provenientes del tanque de aireación.

Cuerpo receptor	Es todo cuerpo de agua (río, lago, agua subterránea, mar) susceptible de recibir directa o indirectamente vertidos o descargas de aguas residuales.
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)	La medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	La medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.
Efluente	Las aguas residuales descargadas por un ente generador.
Límite máximo permisible	Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales.
Lodos	Sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del tratamiento de aguas residuales.

Parámetro	Variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.
Patógeno	Elemento o medio capaz de producir algún tipo de enfermedad o daño en el cuerpo de un animal, un ser humano o un vegetal.
pH	Expresión usual para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución. El intervalo adecuado de pH para la existencia de vida biológica es entre pH 5 y 9. Las aguas residuales con valores de pH menores a 5 y superiores a 9 son de difícil tratamiento mediante procesos biológicos.
Soplante	Equipo encargado de suministrar caudales de aire variables dentro de un intervalo de presiones muy limitado, bajo condiciones ambientales diversas.
Tratamiento de aguas residuales	Cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

RESUMEN

El estudio se enfocó en el tratamiento de aguas residuales domiciliarias por lodos activados en modalidad de aireación extendida, utilizando tres técnicas aeróbicas distintas en el tanque de aireación, siendo estas: a) la inyección de aire por medio de difusores de burbuja fina y burbuja gruesa, y b) aireación mecánica, utilizando el aireador Venturi Jet.

Se tomaron muestras tanto en la entrada del tanque de aireación, como en la salida del clarificador, las cuales fueron analizadas, con el fin de determinar el porcentaje de remoción de los parámetros en estudio, tales como DBO₅, DQO y sólidos totales, entre otros.

Por otro lado, se determinó el porcentaje de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, de acuerdo a la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado. La PTAR que presentó un mayor porcentaje de remoción de DBO₅ y transferencia de oxígeno en el tanque de aireación fue la de burbuja fina, con valores de 91.20% y 37.67% respectivamente.

Mediante el procedimiento de Tukey y un análisis de varianza, se determinó, con un nivel de confianza de 95%, que existe una diferencia significativa entre el uso de cada técnica aeróbica.

ABSTRACT

The study focused in domestic wastewater treatment by extended aeration activated sludge, using three different ways to introduce air, at the aeration tank, which are: a) air injection by fine and coarse bubble diffusers, and b) mechanical system, using the Venturi Jet system.

Samples of water were taken as much at the entrance of the aeration tank, as in the outlet of the clarifier, in three domestic wastewater treatment plants. The samples were analyzed with the purpose of determining the removal percentage of the principal parameters in study, such as Biochemical Oxygen Demand (BOD_5), Chemical Oxygen Demand (COD) and total solids, among others.

On the other hand, the percentage of oxygen transference was determined in the aeration tank, according to the relation between the mass of transferred oxygen and the mass of provided oxygen. The treatment plant that use fine bubbles, was the one that presented the greater percentage of BOD_5 removal and oxygen transference in the aeration tank, with values of 91.20% and 37.67%, respectively.

Through Tukey's test and a variance analysis, was determined, with a level of 95% confidence that, exists a significant difference between the use of each aerobic technique, at the aeration tank.

OBJETIVOS

General:

Evaluar la eficiencia de las técnicas aeróbicas de burbuja fina, burbuja gruesa y aireador Venturi Jet en el tratamiento de agua residual domiciliar, para el sistema de lodos activados en modalidad de aireación extendida.

Específicos:

1. Efectuar los análisis fisicoquímicos cualitativos y cuantitativos para realizar la caracterización del agua residual en la entrada del tanque de aireación y en la salida del proceso, para determinar la eficiencia de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios, tomando como base lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.
2. Determinar la eficiencia de la transferencia de oxígeno en el sistema de lodos activados en aireación extendida, por medio de la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado en el tanque de aireación para cada una de las técnicas aeróbicas.
3. Comparar ventajas y desventajas de cada una de las técnicas aeróbicas en estudio.

INTRODUCCIÓN

La contaminación de cuerpos receptores naturales tales como ríos, lagos, o inclusive mares, es una situación alarmante en nuestro país. La contaminación de estos cuerpos, es debido a las descargas directas de aguas residuales sin tratamiento alguno. Es por esto que nace la inquietud de estudiar los posibles procesos para llevar a cabo el tratamiento de estas aguas. El presente trabajo se enfocó, en el tratamiento biológico de lodos activados en modalidad de aireación extendida.

El desarrollo del proyecto titulado: “Evaluación de la eficiencia de las técnicas aeróbicas (burbuja fina, burbuja gruesa y aireador Venturi Jet) a utilizar en el tratamiento de agua residual domiciliar para el sistema de lodos activados en modalidad de aireación extendida” tuvo como fin, evaluar las eficiencias tanto de la transferencia de oxígeno, como la de remoción de parámetros de calidad fisicoquímicos en el tanque de aireación de una planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias, para cada una de las técnicas aeróbicas mencionadas anteriormente.

Para evaluar dichos porcentajes de eficiencias, se realizaron pruebas en plantas de tratamiento de agua residual domiciliar ubicadas en la ciudad de Guatemala, en las cuales se utilizaran dichas técnicas. Se realizaron siete corridas de cada prueba a llevar a cabo, para cada técnica aeróbica en estudio, con lo cual posteriormente se logró realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos, para identificar si se obtenían los mismos resultados, independientemente de la técnica aeróbica que se utilizara. Por otro lado, también se verificó que la calidad de los efluentes cumpliera con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.

1. ANTECEDENTES

El tratamiento de aguas residuales es de suma importancia para proteger la salud pública y el medio ambiente, ya que estas aguas pueden ser vertidas a un cuerpo receptor natural, tales como ríos, lagos o inclusive al mar; por lo tanto es necesario realizar un tratamiento previo a descargar dichas aguas para evitar enfermedades causadas por bacterias y virus en las personas que entran en contacto con esas aguas, y también para proteger a la flora y fauna del cuerpo receptor natural.

El proyecto denominado “Evaluación de la eficiencia de las técnicas aeróbicas (burbuja fina, burbuja gruesa y aireador Venturi Jet) a utilizar en el tratamiento de agua residual domiciliar para el sistema de lodos activados en modalidad de aireación extendida” se llevó a cabo en una empresa dedicada a brindar soluciones hidráulicas integrales. Dicha empresa cuenta con varias divisiones, entre las cuales se encuentra la división de Tratamiento de agua y filtración, en la cual se desarrolló el proyecto.

Esta división con deseo de innovar y prestar un nuevo servicio a sus clientes, desea incorporar el área de Tratamiento de agua residual, enfocándose inicialmente en el diseño de plantas de tratamiento de agua residual por medio de sistemas aeróbicos, con énfasis en el método de lodos activados en modalidad de aireación extendida.

Por lo tanto, se requirió analizar las distintas técnicas aeróbicas posibles a utilizar en una planta de tratamiento de agua residual domiciliar, para lograr diferenciar cual de ellas es la más eficiente, desde el punto de vista de la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, según los casos que se presenten.

La empresa desea enfocarse en la aplicación de los métodos comúnmente utilizados para introducir oxígeno al contenido de los tanques de aireación, los cuales son: a) inyección de aire con difusores de aire y b) aireación mecánica.

Como se mencionó anteriormente, se requería evaluar la eficiencia de cada técnica aeróbica en estudio, para lograr concluir, cual de ellas presenta la mayor eficiencia, en relación a la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, para llevar a cabo la remoción de parámetros fisicoquímicos de calidad, tales como: carga orgánica, carga de nutrientes y carga de sólidos, presentes en el afluente.

Se tomó como la más eficiente, la técnica que presentó el mayor porcentaje de remoción de cargas del afluente y transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, para obtener un efluente con una calidad, que cumpla con los parámetros establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: "Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos".

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. Desde el punto de vista de su origen, resultan de la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas de habitación, edificios comerciales e instituciones, junto con los provenientes de los establecimientos industriales, y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puedan agregarse. (4-15)

2.1.1 Constituyentes

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química, y biológica. Las principales propiedades físicas y los principales constituyentes químicos y biológicos presentes en las aguas residuales, son:

- a) Propiedades físicas: color, olor, sólidos, temperatura.
- b) Constituyentes químicos:
 - 1) **Orgánicos:** carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, contaminantes prioritarios, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles, otros.
 - 2) **Inorgánicos:** alcalinidad, cloruros, metales pesados, nitrógeno, pH, fósforo, contaminantes prioritarios, azufre.
 - 3) **Gases:** sulfuro de hidrógeno, metano, oxígeno.
- c) Constituyentes biológicos: animales, plantas, protistas y virus.

Las normas que regulan los tratamientos de aguas residuales, están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, deben de eliminarse los compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y en algunos casos, sólidos inorgánicos disueltos. (1-23)

La importancia de remover los contaminantes de las aguas residuales, se presentan en la tabla I.

Tabla I. Contaminantes de importancia en el tratamiento del agua residual

Contaminante	Razón de la Importancia
Sólidos en suspensión	Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaerobias, cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas animales. Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los organismos patógenos presentes en el agua residual.
Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada.

Contaminantes prioritarios	Son compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada.
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos, se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

Fuente: Ingeniería de aguas residuales. Metcalf y Eddy. (5)

2.1.2 Métodos analíticos

Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos. Estos últimos se utilizan para determinar parámetros no relacionados con las propiedades másicas o volumétricas del agua.

2.1.3 Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales

A continuación se presenta una breve descripción de las características de las principales propiedades físicas y los principales constituyentes químicos y biológicos presentes en las aguas residuales, mencionados anteriormente.

2.1.3.1 Sólidos totales

La característica física más importante del agua residual es el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que se sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables se expresan en ml/l y constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodo que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. Los sólidos totales pueden clasificarse en filtrables o no filtrables (sólidos en suspensión) haciendo pasar un volumen conocido de líquido por un filtro. (4-20)

2.1.3.2 Materia Orgánica

Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40% de los sólidos filtrables de una agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos de origen animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en algunos casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%) y grasas, y aceites (10%). Otro compuesto orgánico con muy importante presencia en el agua

residual es la urea, principal constituyente de la orina. No obstante, debido a la velocidad del proceso de descomposición de la urea, raramente está presente en aguas residuales que no sean muy recientes. El parámetro de contaminación orgánica más empleado, que es aplicado tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) a 5 días. La determinación de este, está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. Los resultados de los ensayos de DBO se emplean para: 1) determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente; 2) dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; 3) medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento y controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos. (1-57)

2.1.3.3 Materia Inorgánica

Las concentraciones de los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, como por ejemplo los cloruros, la alcalinidad, el nitrógeno, el azufre, algunos compuestos tóxicos inorgánicos y algunos metales pesados como el níquel, el manganeso, el plomo, el cromo, el cadmio, el zinc, el cobre, el hierro y el mercurio. Es de suma importancia mencionar la concentración de ion hidrógeno (pH), ya que es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evaluación de las aguas. (1-48)

2.1.3.4 Gases

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), y el metano (CH_4). Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales. El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios, así como para otras formas de vida. Debido a que la velocidad de las reacciones bioquímicas que consumen oxígeno aumenta con la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos en la época de verano. (4-21)

2.1.3.5 Microorganismos

Los principales grupos de organismos presentes tanto en aguas residuales como superficiales se clasifican en organismos eucariotas, bacterias y arqueobacterias. Las bacterias desempeñan un papel amplio y de gran importancia en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en el marco natural como en las plantas de tratamiento. Los protozoarios de importancia para el saneamiento, son: las amebas, los flagelados y los ciliados libres y fijos. Los protozoarios se alimentan de bacterias y de otros microorganismos microscópicos. Tienen una importancia capital, tanto en el funcionamiento de los tratamientos biológicos, como en la purificación de cursos de agua, ya que son capaces de mantener el equilibrio natural entre los diferentes tipos de microorganismos. Se debe controlar el agua de suministro ya que ciertos protozoarios son también patógenos, tales como *Cryptosporidium parvum* y la *Giardia lamblia*. (6)

2.1.3.5.1 Crecimiento bacteriano

Las bacterias se reproducen por fisión binaria, de manera sexual o por gemación. En general lo hacen por fisión binaria; la célula original se convierte en dos organismos nuevos. El tiempo requerido para cada división, conocido como tiempo de generación, puede variar desde menos de 20 minutos hasta varios días.

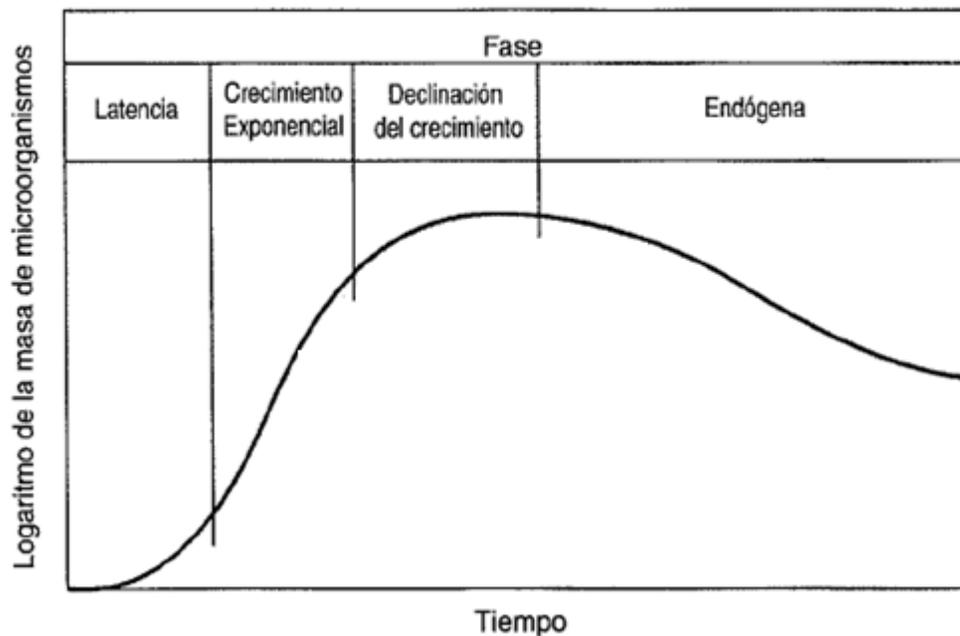
2.1.3.5.2 Crecimiento en términos de masa bacteriana

El patrón de crecimiento, en términos de masa de microorganismos, puede describirse así:

1. La fase de latencia: Las bacterias requieren de tiempo para aclimatarse a su ambiente nutricional. La fase de latencia en términos de masa bacteriana no es tan larga como su fase correspondiente en términos de números de microorganismos porque la masa empieza a incrementarse después de que tiene lugar la división celular.
2. La fase de crecimiento exponencial: Existe siempre un exceso en la cantidad de alimento que rodea a los microorganismos, y la velocidad del metabolismo y crecimiento es sólo una función de la habilidad del microorganismo para procesar el sustrato.
3. La fase de declinación del crecimiento: La velocidad de incremento de la masa bacteriana disminuye debido a la limitación en el suministro de alimento.
4. La fase endógena: Los microorganismos son forzados a metabolizar su protoplasma sin que haya remplazo, debido a que la concentración de alimento disponible se encuentra al mínimo. Durante esta fase puede ocurrir el fenómeno conocido como lisis, en el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden hacia el exterior para

suministrar alimento a las células vivas restantes (conocido como crecimiento críptico). (1-357)

Figura 1. Curva característica de crecimiento bacteriano en términos del registro de la masa de los organismos



Fuente: Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. (1)

Las condiciones ambientales pueden controlarse regulando el pH, la temperatura y los elementos trazas que se agregan, así como añadiendo o excluyendo el oxígeno y la mezcla apropiada. El control de las condiciones ambientales asegurará que los microorganismos tengan un medio adecuado para crecer.

Para asegurar que los organismos crezcan, se debe permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente como para que se reproduzcan. El tiempo requerido depende de su tasa de crecimiento, la cual se relaciona directamente con la velocidad a la cual ellos metabolizan o utilizan los

desechos. Suponiendo que las condiciones ambientales se controlan adecuadamente, se puede asegurar la estabilización efectiva de los desechos al controlar la tasa de crecimiento de los microorganismos. (1-358)

2.1.3.5.3 Crecimiento celular

La tasa de crecimiento de las células bacterianas se puede definir con la siguiente ecuación:

$$r_g = \mu X \quad \text{Ecuación 1}$$

En donde:

r_g = Tasa de crecimiento bacteriano, masa/unidad de volumen· tiempo

μ = Tasa específica de crecimiento de las células, tiempo⁻¹

X = Concentración de microorganismos, masa/ unidad de volumen

2.2 Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso por el cual los sólidos que el líquido contiene son separados parcialmente, haciendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos muy putrescibles queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del proceso de tratamiento empleado. Una vez completado todo el proceso de tratamiento es aun necesario disponer de los líquidos y los sólidos que se hayan separado. El sitio en donde se lleva a cabo dicho proceso es denominado planta de tratamiento de agua residual. (4-31)

2.2.1 Métodos de tratamiento de las aguas residuales

A pesar que son muchos los métodos usados para el tratamiento de las aguas residuales, todos pueden incluirse dentro de los procesos siguientes:

a) Tratamiento preliminar:

En la mayoría de las plantas, el tratamiento preliminar sirve para proteger el equipo de bombeo y hacer más fáciles los procesos subsecuentes del tratamiento. Los dispositivos para el tratamiento preliminar están destinados a eliminar o separar los sólidos mayores o flotantes, a eliminar los sólidos inorgánicos pesados y eliminar cantidades excesivas de aceites o grasas. (4-42)

b) Tratamiento primario:

Por este tratamiento se separan o eliminan la mayoría de los sólidos suspendidos en las aguas negras, o sea aproximadamente de 40-60%, mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación. Cuando se agregan ciertos productos químicos en los tanques primarios, se eliminan casi todos los sólidos coloidales, así como los sedimentables, o sea un total de 80-90% de los sólidos suspendidos. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta. (4-42)

c) Tratamiento secundario:

Este tratamiento debe hacerse cuando las aguas residuales todavía contienen, después del tratamiento primario, más sólidos orgánicos en suspensión o solución que los que puedan ser asimilados por las aguas receptoras son oponerse a su uso normal adecuado. El tratamiento secundario depende principalmente de los organismos aerobios, para la descomposición de los sólidos orgánicos hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables. (4-43)

d) Tratamiento terciario:

El tratamiento terciario o avanzado consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes tales como nitrógeno y fósforo del efluente final. El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano considerable. (6)

e) Cloración:

Este es un método de tratamiento que puede emplearse para diversos propósitos, en todas las etapas de un tratamiento de aguas residuales y aún antes del tratamiento preliminar. Generalmente se aplica el cloro a las aguas negras con los siguientes propósitos: 1) Desinfección o destrucción de organismos patógenos; 2) Prevención de la descomposición de las aguas residuales para controlar el olor; 3) Ajuste o abatimiento de la demanda de DBO. (4-43)

f) Tratamiento de lodos:

Los lodos de las aguas residuales están constituidos por los sólidos que se eliminan en las unidades de tratamiento primario y secundario, junto con el agua que se separa con ellos. En algunos casos es satisfactoria la disposición de ellos sin someterlos a tratamiento, generalmente es necesario tratarlos en alguna forma para prepararlos o acondicionarlos para disponer de ellos sin originar condiciones inconvenientes. Este tratamiento tiene dos objetivos, siendo el primero de éstos eliminar parcial o totalmente el agua que contienen los lodos para disminuir su volumen en fuerte proporción y, en segundo lugar, para que se descompongan todos los sólidos orgánicos putrescibles transformándose en sólidos minerales o sólidos orgánicos relativamente estables. (3-83)

El tratamiento de los lodos sedimentados se lleva a cabo en un tanque digestor de lodos. El proceso de digestión de los lodos puede ser anaeróbico (simplificación de la materia orgánica por bacterias, sin oxígeno), o aeróbico (simplificación de la materia orgánica por bacterias, en presencia de oxígeno). Las técnicas más utilizadas en la digestión de lodos son:

- 1) Eras de secado: El procedimiento consiste en la disposición de los lodos a secar, sobre una superficie al aire libre dotada de un buen drenaje. La altura de la capa extendida varía según las características del lodo. Para lodos urbanos digeridos se disponen capas de 20 a 30 cm. La superficie de las Eras varía en función del clima de la zona. La “torta” de lodos se suele secar cuando la humedad de la misma desciende por debajo del 40%. Un puente rascador que se mueve sobre unos carriles, pueden emplearse en la extracción de la torta de lodo. (6)
- 2) Deshidratador de lodos: Se efectúa a través de un filtro prensa de banda y consiste en coagular el lodo mediante un químico biodegradable, posteriormente se filtra a través de bandas de tela. El producto final puede ser manejable como sólidos. Para estabilizar los lodos, se procede a la aplicación de una dosis de cal hidratada. (6)

2.2.2 Procesos que intervienen en el tratamiento de aguas residuales

2.2.2.1 Operaciones físicas unitarias

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales, en la que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas se conocen como

operaciones físicas unitarias. Las operaciones físicas unitarias más comúnmente empleadas en tratamiento del agua residual, son: medición del caudal, desbaste, homogenización del caudal, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración, transferencia de gases y volatilización y arrastre de gases. (1-221)

2.2.2.2 Procesos químicos unitarios

Los procesos empleados en el tratamiento de las aguas residuales en los que las transformaciones se producen mediante reacciones químicas reciben el nombre de procesos químicos unitarios. Con el fin de alcanzar los objetivos del tratamiento del agua residual, los procesos químicos unitarios se llevan a cabo en combinación con las operaciones físicas unitarias descritas anteriormente y los procesos biológicos unitarios de los que se hablará más adelante. Los procesos químicos principales utilizados en el tratamiento de aguas residuales, son: precipitación química, adsorción, desinfección con cloro, decoloración, desinfección con dióxido de cloro, desinfección con cloruro de bromo, desinfección con ozono, desinfección con luz ultravioleta, y otros. (1-221)

2.2.2.3 Procesos biológicos unitarios

Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso del agua residual doméstica, el principal objetivo es la reducción de la materia orgánica presente y, en muchos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. En el caso de las aguas residuales industriales, el principal objetivo es la reducción de la concentración de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. (1-221)

La eliminación de la DBO_5 carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la estabilización de la materia orgánica se consiguen, biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Los microorganismos se utilizan para convertir la materia carbonosa coloidal y disuelta en diferentes gases y tejido celular. Dado que el tejido celular tiene un peso específico ligeramente superior al del agua, se puede eliminar por decantación. Es importante señalar que, salvo que se separe de la solución, el tejido celular que se produce a partir de la materia orgánica, no se alcanzará un tratamiento completo. Si no se separa el tejido celular, el único tratamiento que se habrá llevado a cabo es el asociado con la conversión bacteriana de una fracción de la materia orgánica presente originalmente en diversos productos gaseosos finales. Algunos de los principales procesos biológicos, son: procesos aerobios, procesos anaerobios, desnitrificación anóxica, eliminación biológica de nutrientes, procesos facultativos, eliminación de la DBO_5 carbonosa, nitrificación, desnitrificación, entre otros. (3-84)

2.3 Sistemas de tratamiento secundario aeróbicos

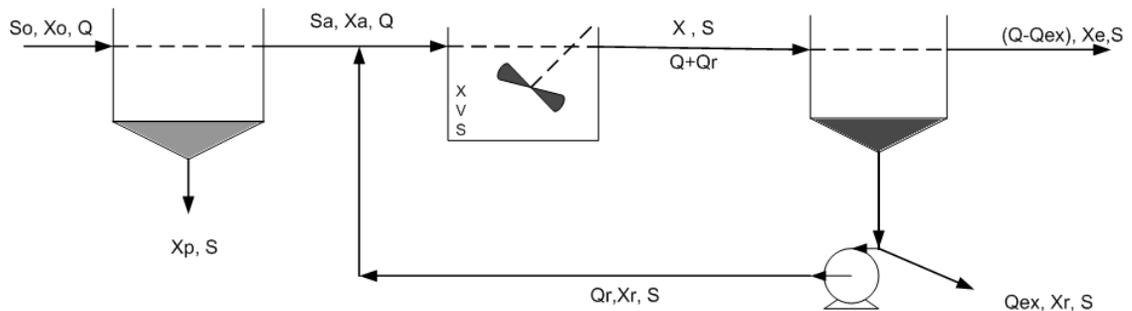
Los procesos aerobios son los procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno, obteniendo como subproducto dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Este proceso puede llevarse a cabo, de dos formas:

- 1) Procesos de cultivo en suspensión: son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular, se mantienen en suspensión dentro del líquido. Dentro de esta clasificación se encuentran: el proceso de lodos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia. (1-400)

2) Procesos de cultivo fijo: son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular están fijados a un medio inerte, tal como piedras, escorias, o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir con esa función. Los procesos de cultivo fijo también se conocen con el nombre de procesos de película fina. En esta rama se encuentran: los filtros percoladores, los filtros de desbaste, sistemas biológicos rotativos, y reactores de lecho compacto. (1-400)

2.3.1 Sistemas de tratamiento por lodos activados

Figura 2. Diagrama de lodos activados convencionales



Éste es un proceso biológico de contacto, en el que los organismos vivos aerobios y los sólidos orgánicos de las aguas residuales, se mezclan íntimamente en un medio ambiente favorable para la descomposición aeróbica de los sólidos. El agua residual afluyente y el lodo activado son íntimamente mezclados, agitados y aireados (en unidades llamadas tanques de aireación), para luego ser separados del agua residual (por sedimentación en

decantadores). Como el medio ambiente está formado por las mismas aguas residuales, la eficacia del proceso depende de que se mantenga continuamente oxígeno disuelto en las aguas residuales durante todo el tratamiento. El oxígeno puede suplirse por absorción forzada de la atmósfera o por inyección de aire en el medio líquido. (4-399)

En el tanque de aireación, también denominado reactor aerobio, se encuentra una población bacteriana destinada a procesar este nutriente. Esa población de microorganismos (masa biológica) es generada y mantenida en niveles compatibles con el alimento introducido. Se cuantifica esta masa biológica a través de los sólidos en suspensión volátiles (SSV) registrados en la mezcla formada en el tanque de aireación.

Los lodos activados están formados por flóculos parduscos que consisten, principalmente, en materia orgánica procedente de las aguas residuales, poblados por miríadas de bacterias y otras formas de vida biológica. Estos lodos activados, con sus organismos vivos, tienen la propiedad de absorber o de adsorber la materia orgánica coloidal y disuelta, incluyendo el amoníaco de las aguas residuales con lo que disminuye la cantidad de sólidos suspendidos. Los organismos biológicos utilizan como alimento al material absorbido convirtiéndolo en sólidos insolubles no putrescibles. Casi toda esta transformación es un proceso que se verifica gradualmente. Algunas bacterias atacan las sustancias complejas originales, produciendo como desechos compuestos más simples. Otras bacterias usan estos desechos, produciendo compuestos aún más simples, continuando así el proceso hasta que los productos finales de desecho no puedan ya ser usados como alimento por las bacterias. (4-115)

Los lodos activados deben de mantenerse en suspensión durante su período de contacto con las aguas residuales a tratar, mediante algún método de agitación. Por lo tanto, el proceso de lodos activados consta de las siguientes etapas:

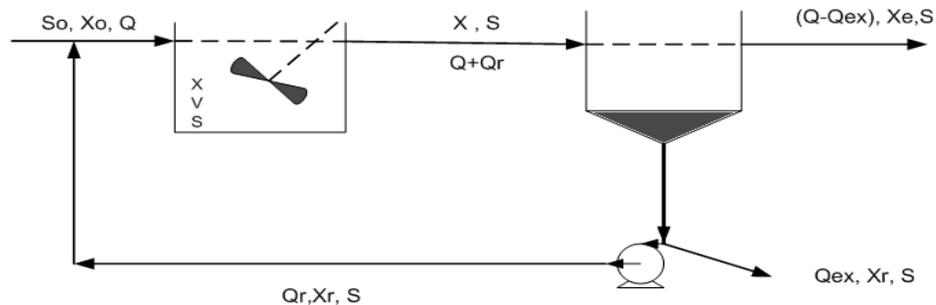
- 1) Mezclado de los lodos activados con las aguas residuales que se van a tratar.
- 2) Aireación y agitación de este licor mezclado durante el tiempo que sea necesario.
- 3) Separación de los lodos activados, del licor mezclado.
- 4) Recirculación de la cantidad adecuada de lodos activados, para mezclarlos con las aguas residuales.
- 5) Disposición del exceso de lodos activados.

Se han desarrollado diversas variaciones para llevar a cabo los pasos anteriores, con el propósito de lograr diferentes condiciones. Esto ha dado origen a que se use el término “método convencional de lodos activados” para distinguir el proceso original, asignando nombres específicos a las variaciones del proceso original. Las variantes más comunes de los sistemas de lodos activados, son:

- a) Lodos activados convencionales (Flujo en pistón)
- b) Lodos activados con aireación extendida
- c) Lodos activados de flujo intermitente

2.3.2 Sistema de lodos activados con aireación extendida

Figura 3. Diagrama de lodos activados con aireación extendida



Similar al sistema de lodos activados convencional, con la diferencia de que la biomasa permanece más tiempo en el sistema (los tanques de aireación son de mayor dimensión). Con esto, existe menos DBO_5 disponible para las bacterias, lo que permite consumir material celular para su propia supervivencia, consecuentemente el lodo retirado ya sale estabilizado. No incluyen unidades de decantación primaria. (1-403)

2.4 Aireación

La aireación y otras operaciones de transferencia de gas, sirven a una multitud de propósitos tanto en tratamiento de agua como de aguas residuales. Aún cuando la transferencia de gas es un fenómeno físico en el que se intercambian moléculas de gas entre un líquido y un gas en la interfaz o superficie de contacto gas-líquido, la operación física va acompañada más frecuentemente de cambios químicos, bioquímicos y biológicos, así como biofísicos. En muchos casos, el objetivo compartido de ingeniería de la aireación consiste ya sea en la remoción de gases y otras sustancias volátiles

del agua, o bien en su adición al agua, o ambos simultáneamente. En algunas ocasiones, sin embargo, puede inyectarse aire al agua sólo para fines de agitación. Entonces el intercambio de gas se convierte en una operación secundaria. (3-131)

2.4.1 Sistemas de aireación

Por lo general, se usan cuatro tipos de aireadores: 1) aireadores por gravedad; 2) aireadores de boquillas; 3) difusores, y 4) aireadores mecánicos. Los dos principales métodos para la aireación del agua residual son: a) la introducción en el agua residual de aire u oxígeno puro mediante difusores sumergidos u otros sistemas de aireación, y b) agitación mecánica del agua residual para promover la disolución de aire de la atmósfera. (3-133)

2.4.1.1 Difusores de aire y su clasificación

La mayor parte de los difusores de aire o aireadores de inyección introducen aire comprimido al agua a través de orificios o boquillas colocadas en tuberías, placas difusoras o rociadores de aire. Las burbujas ascendentes adquieren velocidades terminales menores de las que alcanzarían gotas de agua si cayesen libremente en el aire a través de la misma distancia. Esto incrementa el tiempo de exposición de las burbujas de aire, pero reduce la turbulencia en la interfaz de la burbuja. El flujo en espiral o a contracorriente puede alargar la trayectoria de recorrido tanto del aire como del agua. Es fundamental que el aire suministrado esté limpio y libre de partículas de polvo que pudieran obturar los difusores. Para ello se suelen emplear filtros de aire, constituidos normalmente por materiales secos o con impregnación viscosa.

Los filtros deben de instalarse antes de la toma de alimentación de los soplantes. (3-137)

Los difusores de aire se pueden clasificar:

- 1) De acuerdo con los tipos de burbujas formadas
 - Burbujas finas: diámetro inferior a 3 mm
 - Burbujas medias: diámetro entre 3-6 mm
 - Burbujas gruesas: diámetro superior a 6 mm

- 2) De acuerdo con el material de fabricación
 - Difusores porosos cerámicos (plato, disco, domo y tubo cerámico). Desprende burbujas finas.
 - Difusores porosos no cerámicos (discos y tubos de revestimiento flexible porosos). Desprenden burbujas medias.
 - Difusores no porosos (bocales u orificios). Desprenden burbujas grandes o medias.

- 3) De acuerdo con el sistema de montaje
 - Difusores fijos (su limpieza solo es posible con el vaciado del tanque)
 - Difusores montados en un sistema móvil (para su limpieza basta hacer emerger del líquido el brazo sobre el cual está montado).

La eficiencia de los dispositivos de aireación se suele evaluar en agua limpia, ajustándose los resultados a las condiciones de campo mediante factores de conversión. Normalmente, la eficiencia estándar de la transferencia de oxígeno (SOTE) aumenta con la profundidad. Expresa la cantidad de oxígeno absorbido por metro cúbico de aire aplicado, y puede calcularse, mediante la siguiente ecuación:

$$SOTE = \frac{\text{Masa de oxígeno transferida}}{\text{Masa de oxígeno suministrado}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

(Ecuación 7;(7))

2.4.1.2 Aireadores mecánicos y su clasificación

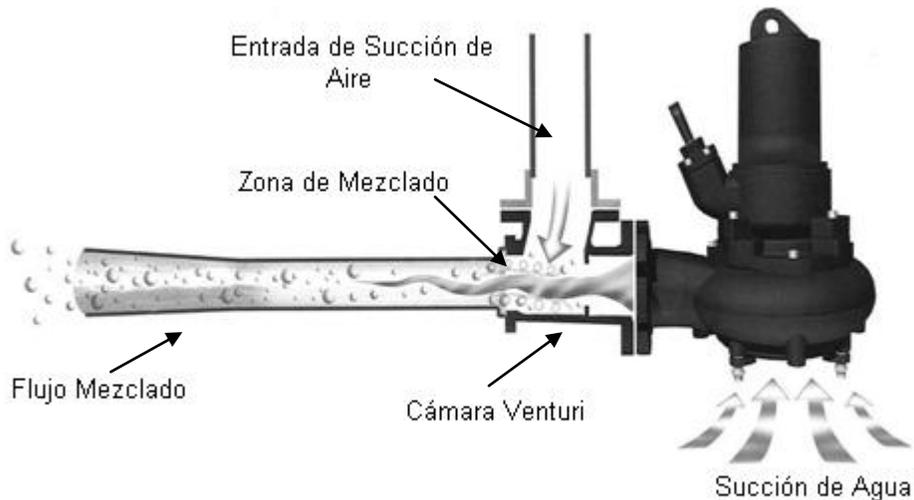
La aireación mecánica, se consigue utilizando la energía mecánica para provocar la ruptura del agua en gotas. El aumento de la transferencia del oxígeno, se logra por incremento en el área de la interfase aire-agua. Estos pueden ser: de eje vertical y horizontal. En el caso del vertical, la transferencia del oxígeno se logra por la exposición de gotas de agua a la atmósfera, por turbulencia del agua y por arrastre de aire. En el horizontal la transferencia de oxígeno es por turbulencia superficial, por arrastre de aire y por bombeo horizontal. Estos pueden ser eléctricos o a combustión, y también los hay híbridos, ejemplo las bombas pulverizadoras y los aireadores de turbina. (1)

Los aireadores mecánicos se pueden clasificar:

- 1) De acuerdo a su ubicación
 - Aireadores mecánicos sumergidos
 - Aireadores mecánicos superficiales
- 2) De acuerdo con el sistema de montaje
 - Aireadores fijos
 - Aireadores flotantes
- 3) De acuerdo con la rotación
 - Baja rotación, flujo radial, con rotación de 20 a 60 rpm
 - Alta rotación, flujo axial, con rotación de 300 a 1,200 rpm
- 4) De acuerdo con el suministro de aire
 - Autoaspirante
 - Presurizada

2.4.1.2.1 Principio de funcionamiento del aireador Venturi Jet

Figura 4. Aireador Venturi Jet



Fuente: Manual de aireación ABS-NOPOL. (7)

Una bomba sumergible genera un flujo primario (agua residual). La menor sección transversal de la boquilla acelera el flujo al entrar en la zona de succión. El aumento de la velocidad origina una reducción de presión suficiente como para aspirar aire (flujo secundario). Cuando ambos flujos pasan por la zona de agitación, se mezclan completamente debido a la turbulencia y abandonan el difusor como un chorro de agua con finas burbujas de aire. La inclusión de burbujas de aire en la corriente es una importante ayuda en el proceso de mezcla. Cabe mencionar, que el nombre de aireador Venturi Jet, hace mención a la alta velocidad con la que el chorro de agua abandona el difusor.

De acuerdo a lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: “Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, para el presente trabajo se tomarán como parámetros fisicoquímicos sanitarios más importantes, los siguientes:

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Sólidos suspendidos
- Sólidos sedimentables
- Sólidos disueltos
- Sólidos totales
- Oxígeno disuelto
- pH
- Temperatura

3. DISEÑO METODOLÓGICO

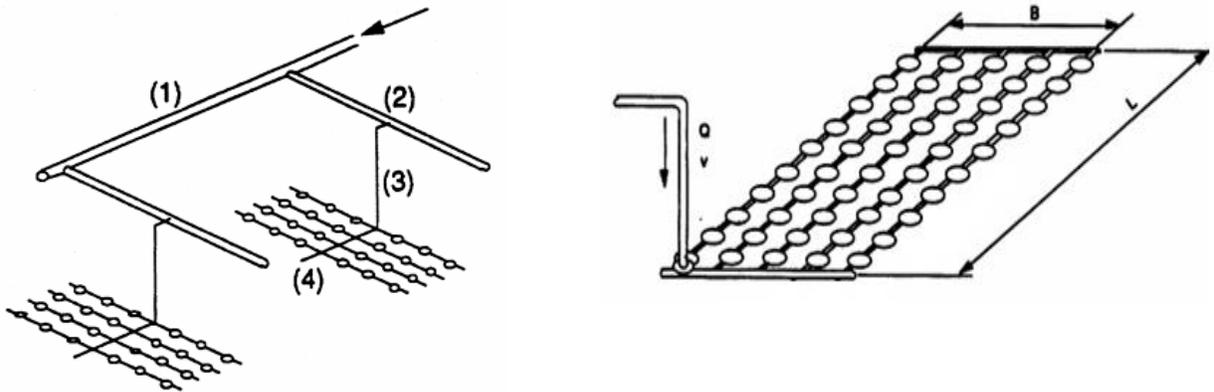
3.1 Delimitación de campo de estudio

El estudio se llevó a cabo únicamente en plantas de tratamiento de agua residual domiciliar ubicadas en la ciudad de Guatemala. El agua residual domiciliar se refiere a las aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.

Se utilizaron tres plantas de tratamiento de agua residual domiciliar, una de cada una de las técnicas en estudio. Las tres plantas de tratamiento, manejan aproximadamente un caudal medio de $300 \text{ m}^3/\text{d}$, y una concentración de carga orgánica similares. El proceso de aireación en las tres plantas de tratamiento es continuo, es decir la planta trabaja las 24 horas del día, y la profundidad del tanque de aireación era de 4 metros. La masa de oxígeno suministrado en cada planta, fue proporcionada por los encargados de cada planta de tratamiento. Los difusores de burbuja fina y burbuja gruesa eran de disco flexibles porosos de 9" con membrana de EPDM (caucho etileno-propileno-dieno). La diferencia entre ellos, únicamente era el número de orificios en la membrana, ya que para que la burbuja sea gruesa, el tamaño del orificio debe ser mayor. La disposición de los discos dentro del tanque de aireación, era la misma para las dos PTAR. En las siguientes figuras, se muestra la posición de los discos y de los aireadores venturi dentro del tanque de aireación, para cada PTAR.

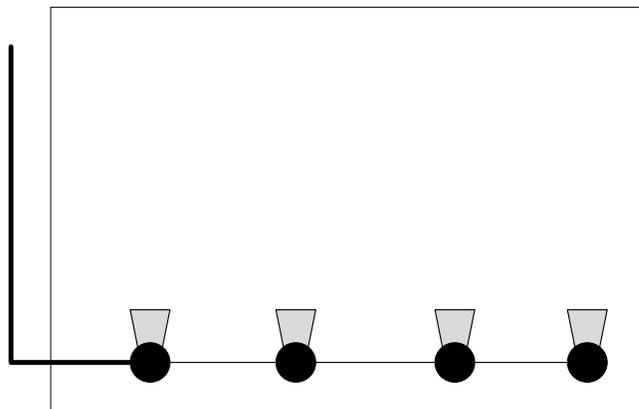
Figura 5. Posición de los dispositivos de aireación dentro del tanque de aireación para cada PTAR

a) Disposición de discos de burbuja fina y gruesa



Fuente: Manual de aireación ABS-NOPOL. (7)

b) Disposición de los aireadores Venturi Jet



Fuente: Manual de aireación ABS-NOPOL. (7)

3.2 Recursos humanos disponibles

Las personas que fueron necesarias para la ejecución del proyecto son:

- Gerencia de la División de Tratamiento de agua y filtración de la Empresa: Xavier Morales
- Personal dentro de la empresa que se vio involucrado.

3.3 Recursos materiales disponibles

El equipo y material que se utilizó en el desarrollo del proyecto es el siguiente:

- Plantas de tratamiento de agua residual domiciliar de lodos activados por aireación extendida, que utilizaran las técnicas de aireación en estudio:
 - 1) Burbuja fina
 - 2) Burbuja gruesa
 - 3) Aireador Venturi Jet
- Espacio físico para realizar pruebas de laboratorio
- Reactivos necesarios para análisis

Tabla II. Recursos materiales disponibles

Descripción	Cantidad (Unidades)
<i>Material y Equipo de Laboratorio</i>	
Probeta de plástico de 1000 ml	1
Probeta de plástico de 2000 ml	1
Beacker de vidrio 150 ml	1
Beacker de vidrio 400 ml	1
Beacker de vidrio 600 ml	5
Embudo	1
Pipeta serológica descartable 2 ml	1
Pipeta serológica descartable 5 ml	2
Pipeta serológica descartable 10 ml	3
Termómetro de mercurio	1
Balanza 2000x 1g	1
Medidor de pH	1
Medidor de oxígeno disuelto	1
Papel filtro Pq/100	1
Cono Imhoff	1
Kit de medición de DQO	1
Kit de medición de DBO ₅	1
Kit de análisis de nitrógeno total	1
Kit de análisis de fósforo total	1
Varilla de agitación de vidrio	2
Espátula	2
Pizeta	1
Caja de mascarillas desechables	1
Caja de guantes desechables	1
Recipientes para recolección de muestras de agua residual	50
Papel mayordomo (rollo)	1
Cronómetro	1
<i>Material y Equipo de Oficina</i>	
Hojas en blanco (paquete)	2
Tape	1
Lapiceros	2
Marcador permanente	1
Computadora	1
Impresora	1
Silla	1

3.3 Técnicas cualitativas y cuantitativas

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el estudio, se requirieron tres plantas de tratamiento de agua residual domiciliar, una planta que utilizara en el tanque de aireación, cada una de las técnicas aeróbicas en estudio; es decir, una PTAR con inyección de aire difuso de burbujas finas, una PTAR con inyección de aire difuso de burbuja gruesa y una PTAR de aireación mecánica, en este caso que utilizara el aireador Venturi Jet.

El estudio se llevó a cabo para lograr identificar, cual de las tres técnicas aeróbicas es la más eficiente desde el punto de vista de la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, y en la remoción de los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios.

Para analizar cada técnica aeróbica, se realizaron siete corridas de toma de muestras de agua residual, tanto en la entrada del tanque de aireación, como en la salida del clarificador, esto con el fin de obtener el porcentaje de remoción de los parámetros fisicoquímicos, anteriormente mencionados, y para lograr realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos. Se realizó ésta cantidad de corridas, debido a que se consideró que este tamaño de muestra, era representativo, y mostraría el comportamiento real de las PTAR, ya que la toma de muestras se realizó al azar.

La toma de muestras se llevó a cabo en distintos días. En un día se visitaban cada una de las tres plantas. Las tomas de muestras para cada planta, se realizaron de forma aleatoria, esto con el fin, de que los datos no se vieran influenciados por el orden de la toma de muestra en cada planta. El orden que se tomó para realizar las visitas a cada planta se presentan en la siguiente tabla:

Tabla III. Orden de visita a cada PTAR en el día

Corrida No.	ORDEN DE VISITA A CADA PTAR EN EL DÍA		
	PTAR Burbuja Fina	PTAR Burbuja Gruesa	PTAR Aireador Venturi Jet
1	2	1	3
2	1	3	2
3	3	2	1
4	1	2	3
5	3	1	2
6	2	3	1
7	1	3	2

Luego de tomar las respectivas muestras, se trasladaban al laboratorio de la empresa, para realizar las pruebas correspondientes.

A las muestras recolectadas, se les hicieron pruebas para determinar los valores de:

- DBO₅
- DQO
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Sólidos suspendidos
- Sólidos sedimentables
- Sólidos disueltos
- Sólidos totales
- Oxígeno disuelto
- pH
- Temperatura

A diferencia de las pruebas mencionadas anteriormente, la medición de oxígeno disuelto, pH y temperatura, se obtuvieron por medio de lecturas directas en cada una de las visitas.

Las mediciones de los parámetros mencionados anteriormente, se realizaron por medio de un espectrofotómetro de campo marca Hach modelo: DR 2010.

3.4 Recolección y ordenamiento de la información

Se tomaron muestras de agua residual a la entrada del tanque de aireación, y a la salida del clarificador. Este procedimiento se realizó siete veces.

La decisión sobre el tamaño muestral se basó en la aplicación monótona de un único contexto teórico como lo es el muestreo aleatorio simple con valores estadísticos típicos, tales como grado de significación $\alpha = 0.05$, lo cual nos proporciona un nivel de confianza del 95%.

Debido a que no se conocía un dato finito del número de corridas a realizar para que los resultados fueran representativos, el tamaño muestral se determinó mediante la siguiente relación:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2} \quad \text{Ecuación 3 (8)}$$

En donde:

n = Tamaño muestral

Z_{α} = Coeficiente prefijado para cierto nivel de confianza (para nivel de confianza del 95%, el valor de Z_{α} es de 1.96)

p = Proporción esperada (en este caso 5% = 0.05)

q = 1-p (en este caso 1-0.05 = 0.95)

d = Amplitud de intervalo de confianza (Éste intervalo de confianza, lo establece el experimentador; en este caso se tomó de acuerdo a las primeras corridas realizadas para el parámetro de DBO_5 , un intervalo de confianza con el valor de 17% = 0.17. Se tomó como referencia el valor de DBO_5 , debido a que el comportamiento de este parámetro es el más importante dentro de una PTAR.)

Por lo tanto, sustituyendo los valores en la ecuación anterior, se tiene:

$$n = \frac{1.96^2 * 0.05 * 0.95}{0.17^2} = 6.31$$

Un tamaño de muestra no puede ser fraccionario por lo que se debe aproximar; en este caso se aproximó a 7, quedando así, establecido el tamaño muestral.

Se consultó el tamaño de la muestra con el asesor, experto en el tema, el cual dio la aprobación del mismo, lo cual fundamenta suficientemente una decisión sobre el tamaño de la muestra que no requiere discusión o replanteamiento.

Siempre debe tomarse en cuenta, que el tamaño muestral no sea muy pequeño, ni muy grande, ya que una muestra demasiado grande implica un desperdicio de recursos y una muestra demasiado pequeña disminuye la utilidad de los resultados.

Se realizaron las pruebas correspondientes a cada una de las muestras, y se obtuvieron los datos que se presentan en las siguientes tablas, para cada una de las plantas de tratamiento de agua residual estudiadas.

Tabla IV. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de burbuja fina

Datos de AR en la entrada al TA para PTAR de burbuja fina								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	375	360	400	366	392	372	368	376.1
DQO (mg/l)	675	648	720	659	706	670	663	677.3
Nitrógeno total (mg/l)	33	30	39	31	37	33	32.4	33.6
Fósforo total (mg/l)	24	22	30	22	29	27	25	25.6
S. Sed. (mg/l)	13	13	15	13	15	13	13	13.6
S. Susp. (mg/l)	425	456	467	463	480	443	431	452.1
S. Dis. (mg/l)	465	449	478	457	470	460	456	462.1
Sólidos totales (mg/l)	903	918	960	933	965	916	900	927.8
OD (mg/l)	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.3	0.25
pH	7.6	7.6	8.1	7.6	7.9	7.9	7.8	7.7
Temperatura (°C)	21	22	23	22	22	22	21	21.8

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja fina.

Tabla V. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de burbuja fina

Datos de AR en la salida para PTAR de burbuja fina								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	35	33	38	33	38	24	31	33.1
DQO (mg/l)	91	86	99	86	99	63	81	86.4
Nitrógeno total (mg/l)	39.6	36	46.8	37.4	44.4	38.2	37.9	40.1
Fósforo total (mg/l)	13.1	11.9	19.3	11.6	18.9	16.8	16.3	15.4
S. Sed. (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0
S. Susp. (mg/l)	64	80	89	76	85	72	86	78.8
S. Dis. (mg/l)	487	481	511	496	498	479	469	488.7
Sólidos totales (mg/l)	551	561	600	572	583	551	555	567.6
OD (mg/l)	5.7	5.8	5.6	5.4	5.5	5.3	5.6	5.5
pH	7.5	7.4	7.8	7.5	7.7	7.7	7.7	7.6
Temperatura (°C)	22	22	22	21	22	21	21	21.5

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja fina.

Tabla VI. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de burbuja gruesa

Datos de AR en la entrada al TA para PTAR de burbuja gruesa								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	395	372	346	350	402	330	341	362.3
DQO (mg/l)	830	782	727	735	845	693	717	761.3
Nitrógeno total (mg/l)	40	36.5	30.9	31	42	27	30	33.9
Fósforo total (mg/l)	3.92	3.4	3.3	3.75	4.85	3.12	3.28	3.66
S. Sed. (mg/l)	5	5	4.5	4.5	6	4.5	4.5	4.8
S. Susp. (mg/l)	392	374	368	345	400	326	385	370
S. Dis. (mg/l)	565	486	465	455	580	450	460	494.4
Sólidos totales (mg/l)	962	865	837.5	804.5	986	780.5	849.5	869.2
OD (mg/l)	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.32
pH	7.9	7.6	7.6	7.8	8	7.4	7.6	7.7
Temperatura (°C)	23	22	21	22	21	21	22	21.7

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja gruesa.

Tabla VII. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de burbuja gruesa

Datos de AR en la salida para PTAR de burbuja gruesa								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	86	82	76	78	89	68	74	79
DQO (mg/l)	198	181	153	157	214	137	149	169.8
Nitrógeno total (mg/l)	42	39.8	34.7	35.3	37	24	34.1	35.3
Fósforo total (mg/l)	13.7	13.3	13.1	13.5	14.62	13	13.1	13.5
S. Sed. (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0
S. Susp. (mg/l)	85	79	74	73	65	63	78	73.8
S. Dis. (mg/l)	482	468	476	466	478	472	496	476.8
Sólidos totales (mg/l)	567	547	550	539	543	535	574	550.7
OD (mg/l)	2.6	2.4	2.7	2.8	2.5	2.7	2.6	2.6
pH	7.5	7.4	7.5	7.4	7.6	7.3	7.4	7.4
Temperatura (°C)	22	22	21	22	21	22	22	21.7

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja gruesa.

Tabla VIII. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la entrada del tanque de aireación para PTAR de Venturi Jet

Datos de AR en la entrada al TA para PTAR de Venturi Jet								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	330	343	364	337	350	370	345	348.4
DQO (mg/l)	644	669	710	658	683	722	673	679.8
Nitrógeno total (mg/l)	31	34.3	36.8	31	35	39	35	34.6
Fósforo total (mg/l)	14.3	15.2	16.4	14.9	15.9	16.7	15.9	15.6
S. Sed. (mg/l)	4	5	5	5	5	6	5	5
S. Susp. (mg/l)	235	243	275	233	250	270	255	251.6
S. Dis. (mg/l)	219	234	243	225	237	256	230	234.8
Sólidos totales (mg/l)	458	482	523	463	492	532	490	491.4
OD (mg/l)	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.37
pH	7.3	7.6	7.8	7.4	7.6	7.9	7.5	7.6
Temperatura (°C)	22	21	21	21	23	21	21	21.4

Fuente: Datos experimentales, PTAR de Venturi Jet.

Tabla IX. Valores de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual en la salida del clarificador para PTAR de Venturi Jet

Datos de AR en la salida para PTAR de Venturi Jet								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	53	58	61	59	65	61	58	59.3
DQO (mg/l)	122	134	141	136	150	141	134	136.8
Nitrógeno total (mg/l)	33	38.9	40.6	33.3	36.4	44	39.2	37.9
Fósforo total (mg/l)	22.8	23.4	24.2	24.6	23.8	24.7	24	23.9
S. Sed. (mg/l)	0	0	0	0	0	0	0	0
S. Susp. (mg/l)	62	54	70	59	60	76	66	63.8
S. Dis. (mg/l)	285	259	262	278	262	291	286	274.7
Sólidos totales (mg/l)	347	313	332	337	322	367	352	338.6
OD (mg/l)	4.8	4.5	4.1	4.3	4.6	4.3	4.4	4.4
pH	7.2	7.3	7.2	7.3	7.5	7.7	7.3	7.3
Temperatura (°C)	22	22	22	22	22	22	22	22

Fuente: Datos experimentales, PTAR de Venturi Jet.

3.6 Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Al tener todos los datos de las siete corridas, para cada una de las tres plantas de tratamiento de agua residual, se procedió, a calcular lo necesario para determinar cual de las tres técnicas aeróbicas en estudio, es la más eficiente desde el punto de vista de la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación y del porcentaje de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios, de acuerdo al proceso de tratamiento por lodos activados en modalidad de aireación extendida. A continuación se presenta el procedimiento que se utilizó para obtener los resultados.

3.6.1 Muestra de cálculo

1. Porcentaje de eficiencia de remoción de los parámetros de calidad fisicoquímicos de las aguas residuales, tales como: DBO₅, DQO, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, sólidos disueltos y sólidos totales.

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{De - Ds}{De} \times 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

De= Dato en entrada al tanque de aireación (mg/l)

Ds= Dato en la salida del clarificador (mg/l)

Ejemplo 1

Utilizando la corrida No. 1 para la planta de tratamiento de agua residual de burbuja fina, determinar el porcentaje de remoción de DBO₅, si el valor del mismo a la entrada del tanque de aireación es de 375 mg/l, y a la salida es de 35 mg/l.

Sustituyendo en la ecuación 4, tenemos:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{375\text{mg/l} - 35\text{mg/l}}{375\text{mg/l}} \times 100 = 90.67\%$$

Nota: Se realizó el mismo procedimiento para determinar el porcentaje de remoción de los demás parámetros fisicoquímicos en estudio. Los resultados obtenidos, se presentan en la siguiente sección.

2. Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación

$$SOTE = \frac{\text{Masa de oxígeno transferida}}{\text{Masa de oxígeno suministrado}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

(Ecuación 7;(7))

En donde:

SOTE=Eficiencia de transferencia de oxígeno (%)

Masa de oxígeno transferido (kg O₂/d)

Masa de oxígeno suministrado (kg O₂/d)

3. Cálculo de masa de oxígeno trasferido en el tanque de aireación

$$SOTR = P * \left(\frac{\text{kgO}_2}{\text{kW}\cdot\text{h}} \right) * 24 \quad \text{Ecuación 5}$$

(Ecuación 6.86; (1))

En donde:

SOTR= Tasa de transferencia de oxígeno estándar en el sistema de aireación instalado (kg O₂/d)

P= Potencia total utilizada en el sistema de aireación (kW)

kg O₂/ kW·h= Transferencia de oxígeno estándar

$$OTR = \frac{SOTR(0.95 \cdot C_s - C_w) \cdot 1.024^{T-20} \cdot \alpha}{9.3}$$

Ecuación 6

(Ecuación 6.94; (1))

En donde:

OTR= Tasa de transferencia de oxígeno con el sistema de aireación actual (kg O₂/d)

SOTR= Tasa de transferencia de oxígeno estándar en el sistema de aireación instalado (kg O₂/d)

C_s= Saturación de oxígeno en agua a cierta temperatura (mg/l)

C_w= Concentración de oxígeno en el proceso de agua residual (tanque de aireación) (mg/l)

α= Factor de corrección de transferencia de oxígeno (adimensional)

T= Temperatura de agua residual (°C)

Ejemplo 2

Determinar la eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de la PTAR de burbuja fina, utilizando los datos de la corrida No. 1. En el tanque de aireación se tiene una concentración de oxígeno disuelto de 5.7 mg/l, y una temperatura de 22 °C. La potencia total utilizada en el sistema de aireación es de 14.91 kW.

Sustituyendo en la ecuación 5 tenemos:

$$SOTR = 14.9 \text{ kW} * \left(3 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right) * 24 = 1072.8 \text{ kg O}_2/\text{d}$$

El valor de transferencia de oxígeno estándar ($\text{kg O}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$), se obtuvo de la tabla A2 del Apéndice.

Como siguiente paso, se procede al cálculo del OTR, por lo tanto se tiene:

$$OTR = \frac{1072.8 \text{ kgO}_2(0.95 * 8.73\text{mg/l} - 5.7) * 1.024^{22-20} * 0.55}{9.3} = 172.65 \text{ kg O}_2/d$$

El valor de C_s a la temperatura correspondiente, y el valor de α se obtuvieron de las tablas A1 y A2 del Apéndice.

El valor de la eficiencia de transferencia de oxígeno, está dada por:

$$SOTE = \frac{172.65 \text{ kg O}_2/d}{493.946 \text{ kg O}_2/d} * 100 = 34.95\%$$

Nota: Se realizó el mismo procedimiento para determinar el porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para las demás corridas. Los resultados obtenidos, se presentan en la siguiente sección.

3.6.2 Presentación de resultados

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos, de acuerdo al procedimiento planteado en la sección anterior, de cada una de las corridas que se llevaron a cabo para cada planta de tratamiento de agua residual.

Tabla X. Porcentaje de remoción de los parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de burbuja fina

Porcentaje de remoción para PTAR de burbuja fina (%)								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	90.66	90.83	90.5	90.98	90.30	93.54	91.57	91.20
DQO (mg/l)	86.51	86.72	86.25	86.94	85.97	90.59	87.78	87.25
Nitrógeno total (mg/l)	-20.00	-20.00	-20.00	-20.64	-20.00	-15.75	-16.97	-19.05
Fósforo total (mg/l)	45.41	45.90	35.66	47.27	34.82	37.77	34.80	40.23
S. Sed. (mg/l)	100	100	100	100	100	100	100	100
S. Susp. (mg/l)	84.94	82.45	80.94	83.58	82.29	83.74	80.04	82.57
S. Dis. (mg/l)	-4.73	-7.12	-6.90	-8.53	-5.95	-4.13	-2.85	-5.74
Sólidos totales (mg/l)	38.98	38.88	37.5	38.69	39.58	39.84	38.33	38.83

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja fina.

Nota: Los valores negativos se utilizaron para indicar, que no hubo remoción de ese parámetro en el proceso, más bien se presentó un incremento, el cual está representado por ese valor.

Tabla XI. Porcentaje de remoción de los parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de burbuja gruesa

Porcentaje de remoción para PTAR de burbuja gruesa (%)								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	78.22	77.95	78.03	77.71	77.86	79.39	78.29	78.21
DQO (mg/l)	76.14	76.85	78.95	78.63	74.67	80.23	79.21	77.81
Nitrógeno total (mg/l)	-5	-9.04	-12.29	-13.87	11.90	11.11	-13.66	-4.40
Fósforo total (mg/l)	-249.48	-291.17	-296.96	-260	-201.44	-316.66	-299.39	-273.59
S. Sed. (mg/l)	100	100	100	100	100	100	100	100
S. Susp. (mg/l)	78.31	78.87	79.89	78.84	83.75	80.67	79.74	80.01
S. Dis. (mg/l)	14.69	3.70	-2.36	-2.41	17.58	-4.88	-7.82	2.64
Sólidos totales (mg/l)	41.06	36.76	34.32	33.01	44.92	31.45	32.43	36.28

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja gruesa.

Nota: Los valores negativos se utilizaron para indicar, que no hubo remoción de ese parámetro en el proceso, más bien se presentó un incremento, el cual está representado por ese valor.

Tabla XII. Porcentaje de remoción de los parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso para PTAR de Venturi Jet

Porcentaje de remoción para PTAR de Venturi Jet (%)								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
DBO ₅ (mg/l)	83.93	83.09	83.24	82.49	81.42	83.51	83.18	82.98
DQO (mg/l)	81.05	79.97	80.14	79.33	78.03	80.47	80.08	79.87
Nitrógeno total (mg/l)	-6.45	-13.41	-10.32	-7.41	-4.00	-12.82	-12.00	-9.48
Fósforo total (mg/l)	-59.44	-53.94	-47.56	-65.10	-49.68	-47.90	-50.94	-53.51
S. Sed. (mg/l)	100	100	100	100	100	100	100	100
S. Susp. (mg/l)	73.61	77.77	74.54	74.67	76.00	71.85	74.11	74.65
S. Dis. (mg/l)	-30.13	-10.68	-7.81	-23.55	-10.54	-13.67	-24.34	-17.25
Sólidos totales (mg/l)	24.23	35.06	36.52	27.21	34.55	31.01	28.16	30.96

Fuente: Datos experimentales, PTAR de Venturi Jet.

Nota: Los valores negativos se utilizaron para indicar, que no hubo remoción de ese parámetro en el proceso, más bien se presentó un incremento, el cual está representado por ese valor.

Tabla XIII. Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de burbuja fina

PTAR de burbuja fina								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
SOTR (kg O ₂ /d)	1073.52	1073.52	1073.52	1073.52	1073.52	1073.52	1073.52	1073.52
OTR(kg O ₂ /d)	172.65	165.99	179.31	198.60	185.96	210.03	190.06	186.09
SOTE (%)	34.95	33.60	36.30	40.20	37.64	42.52	38.47	37.67

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja fina.

Tabla XIV. Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de burbuja gruesa

PTAR de burbuja gruesa								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
SOTR (kg O ₂ /d)	268.38	268.38	268.38	268.38	268.38	268.38	268.38	268.38
OTR(kg O ₂ /d)	120.59	124.83	119.04	116.36	123.18	118.48	120.59	120.44
SOTE (%)	15.15	15.69	14.96	14.62	15.48	14.89	15.15	15.14

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja gruesa.

Tabla XV. Porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación para PTAR de Venturi Jet

PTAR de Venturi Jet								
Parámetro	Corrida No.							\bar{X}
	1	2	3	4	5	6	7	
SOTR (kg O ₂ /d)	432.00	432.00	432.00	432.00	432.00	432.00	432.00	432.00
OTR(kg O ₂ /d)	170.16	184.77	204.25	194.51	179.90	194.51	189.64	188.25
SOTE (%)	23.36	25.37	28.04	26.71	24.70	26.71	26.04	25.85

Fuente: Datos experimentales, PTAR de Venturi Jet.

3.7 Análisis estadístico

A continuación se presenta el procedimiento utilizado para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos, para establecer el valor del porcentaje de eficiencia de cada técnica aeróbica. Se utilizó la media aritmética, para obtener un valor representativo de todos los valores de porcentaje de eficiencia, para cada caso; y se utilizó la desviación estándar para medir el índice de variabilidad respecto a un punto de referencia que es la media aritmética. Se calculó la varianza para cada caso, para luego realizar un análisis de varianzas.

1. Media aritmética

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{N}$$

Ecuación 7
(2-28)

En donde:

\bar{X} = Media aritmética

$\sum Xi$ = Sumatoria de conjunto de valores de la variable

N = Número total de valores

2. Desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Xi - \bar{X})^2}{N}}$$

Ecuación 8
(2-37)

En donde:

σ = Desviación estándar

Xi = Valores de las variables

\bar{X} = Media aritmética

N = Número total de valores

3. Varianza

$$\sigma^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{N}$$

Ecuación 9

(2-37)

En donde:

σ^2 = Varianza

X_i = Valores de la variables

\bar{X} = Media aritmética

N = Número total de valores

Tabla XVI. Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de burbuja fina

% de remoción en PTAR de burbuja fina			
PTAR	Media Aritmética	Desviación Estándar	Varianza
DBO ₅ (mg/l)	91.2020	1.0289	1.0587
DQO (mg/l)	87.2577	1.4639	2.1432
S. Susp. (mg/l)	82.5728	1.5651	2.4496
S. Totales (mg/l)	38.8326	0.7236	0.52373

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja fina, Tabla X.

Tabla XVII. Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de burbuja gruesa

% de remoción en PTAR de burbuja gruesa			
PTAR	Media Aritmética	Desviación Estándar	Varianza
DBO ₅ (mg/l)	78.2125	0.5171	0.2674
DQO (mg/l)	77.8167	1.8268	3.3374
S. Susp. (mg/l)	80.0129	1.6918	2.8623
S. Totales (mg/l)	36.2810	4.6375	21.5070

Fuente: Datos experimentales, PTAR de burbuja gruesa, Tabla XI.

Tabla XVIII. Análisis estadístico para valores de porcentaje de remoción de parámetros fisicoquímicos sanitarios de agua residual al final del proceso, para PTAR de Venturi Jet

% de remoción en PTAR de Venturi Jet			
PTAR	Media Aritmética	Desviación Estándar	Varianza
DBO ₅ (mg/l)	82.9849	0.7534	0.5676
DQO (mg/l)	79.8708	0.8900	0.7921
S. Susp. (mg/l)	74.6554	1.7236	2.9710
S. Totales (mg/l)	30.9661	4.2715	18.2463

Fuente: Datos experimentales, PTAR de Venturi Jet, Tabla XII.

Tabla XIX. Análisis estadístico para valores de porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) en el tanque de aireación

% de SOTE en el tanque de aireación			
PTAR	Media Aritmética	Desviación Estándar	Varianza
Burbuja fina	37.6743	2.83853	8.0572
Burbuja gruesa	15.1383	0.3335	0.1112
Venturi Jet	25.8504	1.4172	2.0085

Fuente: Datos experimentales, Tablas XIII, XIV y XV.

Seguidamente se realizó un análisis de varianza, conocido generalmente con el nombre ANOVA, para efectuar una comparación de los datos de porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, obtenidos para cada técnica en estudio, y así lograr concluir cual de ellas es la más eficiente. El método que se utilizó para realizar las comparaciones es el procedimiento de Tukey (Método T).

El procedimiento para realizar el ANOVA es el siguiente:

1. Se establecieron como hipótesis nula e hipótesis alterna con un nivel de confiabilidad de 95%, las siguientes:

Hipótesis nula:

H_0 : La transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de acuerdo a la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado, no difiere de la técnica aeróbica que se utilice.

Hipótesis alterna:

H_a: La transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de acuerdo a la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado, difiere de la técnica aeróbica que se utilice.

Luego se procede a los siguientes cálculos:

2. Media Muestrales

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^J x_{ij}}{J} \quad i = 1, 2, \dots, I$$

Ecuación 10
(2-414)

3. Gran Media

$$\bar{X}_{..} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}}{J}$$

Ecuación 11
(2-414)

4. Suma Total de Cuadrados (SST)

$$SST = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij}^2 - \frac{1}{IJ} x_{..}^2$$

Ecuación 12
(2-418)

5. Suma de Cuadrados del Tratamiento (SSTr)

$$SSTr = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^I x_{i.}^2 - \frac{1}{IJ} x_{..}^2$$

Ecuación 13
(2-418)

Para las ecuaciones anteriores, se tiene que:

X_{ij} = variable aleatoria que denota la j -ésima medición tomada de la i -ésima población, o la medición tomada de la j -ésima unidad experimental que recibe el i -ésimo tratamiento.

I = número de muestras

J = número de observaciones en cada muestra

x_i = la suma de las x_{ij} para i fija

$x_{..}$ = la suma de todas las x_{ij} (el gran total)

6. Suma de Cuadrados del Error

$$SSE = SST - SSTr$$

Ecuación 14
(2- 418)

Tabla XX. Tabla de ANOVA

Fuente de Variación	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	f
Tratamientos	$I-1$	$SSTr$	$MSTr = SSTr / (I-1)$	$MSTr / MSE$
Error	$I(J-1)$	SSE	$MSE = SSE / [I(J-1)]$	
Total	$IJ-1$	SST		

Fuente: Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. (2)

Luego se procede a determinar el valor crítico de extremo superior $F_{\alpha, I-1, I(J-1)}$ en tablas de valores críticos para la Distribución de F, siendo:

α = nivel de significación

I = número de muestras

J = número de observaciones de cada muestra

Si $f \geq F_{\alpha, I-1, I(J-1)}$ se rechaza H_0 al nivel de significación 0.05.

Procedimiento de Tukey

Seleccionar nivel de significación α . En este caso se tomará $\alpha=0.05$.

Determinar $Q_{\alpha, I, I(J-1)}$ de Tabla de Valores Críticos para la distribución del rango de estudentizado, para $\alpha=0.05$.

Calcular:

$$w = Q_{\alpha, I, I(J-1)} \cdot \sqrt{MSE/J} \quad \text{Ecuación 15}$$

(2-423)

Luego, se procede a listar las medias muestrales en orden creciente y subrayar los pares que difieren en menos que w . Cualquier par de medias muestrales no subrayadas por la misma línea, corresponde a un par de medias poblacionales o de tratamiento considerado significativamente distinto.

Al tomar $\alpha= 0.05$, obtendremos un 95% de índice de confianza de los datos obtenidos.

Ejemplo 3

Realizar el ANOVA para los datos de SOTE obtenidos para cada técnica aeróbica, los cuales se presentan en las tablas XIII, XIV y XV.

Como ya se plantearon, la hipótesis nula, y la hipótesis alterna, se procede al cálculo del ANOVA.

Tabla XXI. Valores de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) para cada planta de tratamiento

Valores de SOTE para cada PTAR										
PTAR	Corrida No.							xi	\bar{x}_i	$\sum \sum x^2_{ij}$
	1	2	3	4	5	6	7			
BF	34.95	33.60	36.30	40.20	37.64	42.52	38.47	175.81	25.11	4440.83
BG	15.15	15.69	14.96	14.62	15.48	14.89	15.15	105.96	15.13	1604.96
VJ	23.36	25.37	28.04	26.71	24.70	26.71	26.04	150.79	21.54	3258.17
Sumatoria								432.57	61.79	9303.97

Fuente: Datos experimentales, Tablas XIII, XIV y XV.

Se tiene:

$$I = 3$$

$$J = 7$$

Por lo tanto:

$$SST = 9303.97 - (432.57)^2/21 = 393.404$$

$$SSTr = \frac{1}{7}((175.81)^2 + (105.96)^2 + (150.79)^2) - \frac{432.57^2}{21} = 357.783$$

$$SSE = 393.404 - 357.783 = 35.621$$

$$MSTr = \frac{357.783}{3 - 1} = 178.892$$

$$MSE = \frac{35.621}{3(7 - 1)} = 1.97894$$

$$F = \frac{178.892}{1.9789} = 90.3997$$

Tabla XXII. Tabla de ANOVA para ejemplo 3

Fuente de Variación	gl	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	f
Tratamientos	3	357.783	MSTr=178.892	90.3937
Error	18	35.621	MSE= 1.978	
Total	20	393.404		

Fuente: Datos experimentales, Análisis estadístico.

Se busca el valor crítico de extremo superior $F_{\alpha, l-1, l(J-1)}$ en tablas de valores críticos para la Distribución de F. (2-750, tabla A.9)

Para $\alpha=0.05$, $l=3$ y $J=7$, se tiene el valor crítico de extremo superior $F_{\alpha, l-1, l(J-1)}= 3.55$

Entonces, teniendo en cuenta que si $f \geq F_{\alpha, l-1, l(J-1)}$ se rechaza H_0 al nivel de significación 0.05.

Como $90.3937 \geq 3.55$, se rechaza la hipótesis nula al nivel de significación de 0.05, lo cual significa que existe una diferencia significativa entre cada una de las tres técnicas aeróbicas estudiadas, respecto a la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación.

Debido a que la hipótesis nula fue rechazada, se procede a realizar el procedimiento de Tukey (método T), con el fin de decidir cuales técnicas difieren de cuales otras.

Se seguirá el procedimiento de Tukey previamente descrito.

Por lo tanto debemos obtener $Q_{\alpha, l, l(J-1)}$ de tabla de valores críticos para la distribución del rango de estudentizado, para $\alpha=0.05$. Dicho dato se obtuvo de la tabla A.10 del apéndice de la Referencia Bibliográfica No. 2.

Por lo tanto, para un $\alpha=0.05$ se tiene que el valor de $Q_{0.05, 3, 18} = 3.61$

Entonces:

$$w = Q_{\alpha, I, I(J-1)} \cdot \sqrt{MSE/J} = 3.61 * \sqrt{\frac{1.97894}{7}} = 1.91944$$

Al ordenar las medias muestrales en orden creciente, tenemos:

$$\begin{array}{ccc} \overline{x_{BG}} & \overline{x_{VJ}} & \overline{x_{BF}} \\ 15.1383 & < & 21.5420 < & 25.1162 \end{array}$$

Al realizar la diferencia de las dos medias muestrales más pequeñas, tenemos que:

$$21.5420 - 15.1383 = 6.4037$$

Como $6.4037 \geq w=1.91944$ se unen dichas medias muestrales con un segmento de línea, y se realiza el mismo procedimiento.

$$\begin{array}{ccc} \overline{x_{BG}} & \overline{x_{VJ}} & \overline{x_{BF}} \\ 15.1383 & 21.5420 & 25.1162 \end{array}$$

De nuevo, al realizar la diferencia de las dos medias muestrales más pequeñas, tenemos que:

$$25.1162 - 21.5420 = 3.5742$$

Como $3.5742 \geq w=1.91944$ se unen dichas medias muestrales con un segmento de línea, con lo cual, puede decirse, que los tres métodos difieren uno de otro.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la experimentación y cálculos realizados son los que presentan a continuación. Dichos resultados son discutidos en la sección de análisis de resultados.

1.- Eficiencia de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios para cada planta de tratamiento de agua residual (PTAR)

Tabla XXIII. Promedio de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos en la salida del proceso para PTAR de burbuja fina

Burbuja fina		
Parámetro	Promedio de Remoción (%)	Observación
DBO ₅	91.20	
DQO	87.25	
Sólidos sedimentables	100	
Sólidos suspendidos	82.57	
Sólidos disueltos	---	Se incrementó el valor de sólidos disueltos en el efluente, en un 5.75%.
Sólidos totales	38.83	
Fósforo total	40.24	
Nitrógeno total	---	Se incrementó el valor de nitrógeno total en el efluente, en un 19.05%.

Fuente: Datos calculados, Tabla X.

Tabla XXIV. Promedio de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos en la salida del proceso para PTAR de burbuja gruesa

Burbuja gruesa		
Parámetro	Promedio de Remoción (%)	Observación
DBO ₅	78.21	
DQO	77.80	
Sólidos sedimentables	100	
Sólidos suspendidos	80.01	
Sólidos disueltos	2.64	
Sólidos totales	36.28	
Fósforo total	---	Se incrementó el valor de fósforo total en el efluente, en un 273.59%.
Nitrógeno total	---	Se incrementó el valor de nitrógeno total en el efluente, en un 4.41%.

Fuente: Datos calculados, Tabla XI.

Tabla XXV. Promedio de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos en la salida del proceso para PTAR con aireador Venturi Jet

Aireador Venturi Jet		
Parámetro	Promedio de Remoción (%)	Observación
DBO ₅	82.98	
DQO	79.87	
Sólidos sedimentables	100	
Sólidos suspendidos	74.65	
Sólidos disueltos	---	Se incrementó el valor de sólidos disueltos en el efluente, en un 17.25%.
Sólidos totales	30.96	
Fósforo total	---	Se incrementó el valor de fósforo total en el efluente, en un 53.51%.
Nitrógeno total	---	Se incrementó el valor de nitrógeno total en el efluente, en un 9.49%.

Fuente: Datos calculados, Tabla XII.

2.- Eficiencia de la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de cada una de las técnicas aeróbicas.

Tabla XXVI. Eficiencia de la transferencia de oxígeno promedio en el tanque de aireación

Técnica Aeróbica	Eficiencia de Transferencia de Oxígeno Promedio (SOTE) (%)
Burbuja Fina	37.67
Burbuja Gruesa	15.14
Aireador Venturi Jet	25.85

Fuente: Datos calculados, Tablas XIII, XIV y XV.

3.- Comparación de cada una de las técnicas aeróbicas en estudio.

Tabla XXVII. Comparación de las técnicas aeróbicas en estudio

Característica	Técnica Aeróbica		
	Burbuja Fina	Burbuja Gruesa	Aireador Venturi Jet
Tamaño de burbuja (diámetro)	1 - 3 mm	Mayores a 6 mm	3-6 mm
Necesidad de filtro de aire	Si	No	No
Presencia de atasco debido a impurezas	Si	No	No
Costo inicial	Alto	Alto	Bajo
Vida útil	6 a 8 años de cada difusor de EPDM	Dependiendo del tipo de difusor 5-10 años	5-20 años Realizando los mantenimientos respectivos
Eficiencia de transferencia de oxígeno	Alta	Baja	Media
Capacidad de oxigenación (kg O ₂ /kw· h)	3.00-4.00	0.75-1.20	1.20-2.40

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios estudiados fueron: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, sólidos disueltos, sólidos totales, oxígeno disuelto, pH y temperatura.

Para llevar a cabo dicho estudio, se visitaron tres plantas de tratamiento de agua residual domiciliarias (PTAR) en la ciudad de Guatemala que utilizaran el sistema de lodos activados en modalidad de aireación extendida, una planta de cada tipo requerido, las cuales tuvieran un caudal medio y carga orgánica similares. Esto con el fin, que la comparación luego de tabulados los datos obtenidos, fuera válida. El caudal medio que manejan las PTAR es de $300 \text{ m}^3/\text{d}$.

El sistema de lodos activados con aireación extendida a diferencia del sistema de lodos activados convencional, carece de un tanque sedimentador primario; por lo tanto el agua residual se conduce al tanque de aireación o reactor aerobio, luego de haber pasado por la sección de pre-tratamiento, que consta de rejillas, en las cuales se extraen todos los sólidos de gran tamaño, para que estos no lleguen a las estaciones de bombeo, y puedan ocasionar daños en las mismas.

Se realizó la caracterización del agua residual en la entrada del tanque de aireación de cada planta, y en la salida del sedimentador secundario o clarificador, para lograr evaluar la eficiencia de remoción de los parámetros mencionados. Se realizaron siete corridas de este procedimiento, para lograr recabar un grupo de datos aceptable, para su posterior análisis. La toma de

muestras, en cada planta se realizó de forma aleatoria, para descartar que el orden de la toma de muestra, influenciara en los datos. Cabe mencionar, que la toma de muestras en el día, se realizaron en el rango de tiempo de 8:00 – 17:00 horas.

En las tablas IV, VI y VIII se muestran los valores de los parámetros de entrada del agua residual al tanque de aireación. En estas puede observarse que los valores de los parámetros varían, ya que las muestras en cada planta, no fueron tomadas a la misma hora, esto debido a que se deseaba observar el comportamiento de la carga orgánica, carga de nutrientes y carga de sólidos, presentes en el afluente.

El sistema de lodos activados con aireación extendida es un proceso biológico en el cual, el agua residual y el lodo activado son mezclados, agitados y aireados completamente en el tanque de aireación, para luego ser separados por sedimentación. La mayor parte del lodo activado separado en el sedimentador secundario o clarificador, es retornado al proceso, mientras una porción menor, es retirada para su tratamiento final, y es a lo que comúnmente se le denomina lodo en exceso.

En el proceso, es necesario suplir oxígeno por inyección de aire en el medio líquido o por absorción forzada de la atmósfera. El agua residual condicionada preliminarmente, ingresa al tanque de aireación con un enorme potencial nutritivo, debido a la materia orgánica cuantificada por la DBO_5 . En el tanque de aireación, se encuentra una población de bacterias, las cuales tienen como función procesar los nutrientes que contiene dicho afluente. La población de microorganismos es generada y mantenida en niveles proporcionales con el alimento introducido. La sobrevivencia de los microorganismos se garantiza con un adecuado suministro de oxígeno, el cual es introducido en el tanque de

aireación, de forma proporcional directa a la actividad orgánica, dentro del mismo.

Dentro del tanque de aireación, las bacterias se encuentran ávidas por alimento, por lo que al alimentarse, éstas liberan componentes químicos llamados enzimas, las cuales tienen la capacidad de degradar la materia orgánica presente. El nutriente condicionado es integrado al organismo de la bacteria.

El alimento asimilado y la reproducción de los microorganismos provocan un aumento rápido de la masa biológica, dentro del tanque de aireación, debido a esto, es necesario eliminar diariamente una parte de las bacterias, y es a lo que anteriormente se le denominó como lodo activado en exceso. Este lodo en exceso, es conducido a un tanque de lodos, en el cual es tratado, para su final disposición.

En las tablas XXIII, XXIV y XXV de la sección de resultados, se muestran los porcentajes promedios de remoción de los parámetros estudiados, para cada una de las plantas de tratamiento estudiadas. Se puede observar que los porcentajes promedios de remoción de DBO_5 , son: 91.20% para PTAR de burbuja fina, 78.21 % para PTAR de burbuja gruesa y 82.98% para PTAR de Venturi Jet. Estos valores representan la degradación de la materia orgánica. Se logran alcanzar valores altos, debido a que el volumen del tanque de aireación en las PTAR de lodos activados con aireación extendida es mayor al volumen del tanque de aireación para lodos activados convencionales; con esto se logra tener menos DBO_5 disponible para las bacterias, lo cual presenta una ventaja en la explotación intensiva del ciclo vital de los microorganismos, debido a que éstos empiezan a consumir material celular para su propia supervivencia, con lo cual, se logra que el lodo retirado, en su mayoría, salga

estabilizado. La PTAR que presenta un mayor porcentaje de remoción de DBO_5 es la de burbuja fina.

La demanda química de oxígeno (DQO) representa la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar químicamente la materia orgánica carbonácea. Al igual que, para la DBO_5 , la PTAR que remueve en mayor porcentaje la DQO es la de burbuja fina, teniendo un valor promedio de 87.25 % de remoción.

Para la remoción de los sólidos totales, los cuales están compuestos por los sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, y sólidos disueltos, la PTAR que representa el mayor porcentaje promedio de remoción es la de burbuja fina, con un valor de 38.83 %, seguido de la PTAR de burbuja gruesa con un valor de 36.28% y por último, la PTAR de Venturi Jet con un valor de 30.96 %. Cabe recalcar, que estos son valores globales de remoción de sólido totales.

En las tablas XXIII, XXIV y XXV, se presentan los porcentajes promedios de remoción para los sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y sólidos disueltos. Puede observarse, que para las tres PTAR existe un 100% de remoción de sólidos sedimentables, con lo cual puede decirse, que todos los flóculos de densidad alta de lodo activado provenientes del tanque de aireación, sedimentan en el clarificador. Por otro lado, la PTAR que presenta el mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos, los cuales son partículas sólidas pequeñas que contrarrestan la fuerza de gravedad, impidiendo así que el sólido se deposite en el fondo, es la PTAR de burbuja fina con un valor de 82.57%, seguido de la PTAR de burbuja gruesa con un valor de 80.01% y por último la PTAR de Venturi Jet con un valor de 74.65%.

Cabe mencionar que para las PTAR de burbuja fina y la de Venturi Jet, el valor de sólidos disueltos, se incrementó, en vez de que se presentara una remoción. Esto puede deberse, a que los microorganismos degradan la materia orgánica en compuestos cada vez más simples, y continúan este proceso, hasta que la materia orgánica no puede simplificarse más. Si tomamos en cuenta que el aumento de los mismos pueda deberse a la recirculación de lodo activado al tanque de aireación, en el cual pueden encontrarse sólidos disueltos, esto nos daría como resultado mayor cantidad de sólidos disueltos en el efluente. Estos sólidos disueltos pueden ser componentes orgánicos o minerales. Por lo tanto, la PTAR que presenta un mínimo porcentaje de remoción, es la de burbuja gruesa, con un valor de 2.64%.

El nitrógeno y el fósforo son esenciales para todos los organismos vivos; son parte fundamental de las moléculas como proteínas y ácidos nucleicos, y nutrientes indispensables en el crecimiento de organismos fotosintéticos. Los compuestos del nitrógeno y del fósforo representan un papel muy importante puesto que son ellos los verdaderamente responsables del crecimiento de los organismos animales y vegetales en el medio acuático. En condiciones normales estos compuestos provienen fundamentalmente de la degradación de la materia orgánica muerta, pero en condiciones del medio alteradas proceden de los vertidos residuales urbanos, detergentes y fertilizantes. El nitrógeno orgánico también es aportado a las aguas residuales a través de las excretas humanas.

Se puede observar en las tablas XXIII, XXIV y XXV de la sección de resultados, que el valor de nitrógeno total en las tres PTAR, se incrementó, con respecto al valor de entrada. Como se mencionó anteriormente, una parte del lodo activado, es retornado al tanque de aireación, como alimento para los microorganismos. Este aumento de nitrógeno en la salida, puede decirse que es

debido al nitrógeno presente en el lodo retornado, por lo tanto se incrementa el porcentaje de nitrógeno a la salida. También puede decirse que el nitrógeno se presenta en las aguas residuales principalmente en forma de nitrógeno orgánico o amoniacal. Dado que el nitrógeno es un nutriente, los microorganismos presentes en el proceso de tratamiento, asimilan el nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. El nitrógeno puede retirarse de las aguas residuales sacando las células del sistema. Sin embargo, en la mayoría de las aguas residuales, hay más nitrógeno del que puede ser asimilado por el tejido celular. En el proceso de tratamiento, el nitrógeno pasa por un proceso denominado nitrificación, en el cual el amonio se oxida a nitrito, y luego a nitrato. La medición de nitrógeno total incluye el nitrógeno orgánico, amoniacal, nitrito y nitrato. Cabe mencionar, que si se quiere eliminar por completo la presencia de nitrógeno en el efluente, se debe introducir un proceso más, el cual es denominado desnitrificación biológica. En este proceso el nitrato se reduce a nitrógeno gaseoso, el cual se deja escapar del sistema.

En las mismas tablas, podemos observar que la remoción de fósforo total, únicamente se dio en la PTAR de burbuja fina, a diferencia de las otras dos plantas de tratamiento, en las cuales el porcentaje de fósforo aumentó. El fósforo se encuentra en las aguas residuales en forma orgánica, y en forma inorgánica como ortofosfato o polifosfatos, los cuales provienen del uso de estos materiales en detergentes sintéticos. Los fosfatos complejos se hidrolizan durante el tratamiento biológico a la forma de ortofosfato (PO_4^{-3}). De un 10-20% del fósforo presente, se incorpora en las células bacterianas durante el tratamiento biológico, el 80 % restante, normalmente se descarga con el efluente.

Otro de los objetivos planteados, fue determinar la eficiencia de la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, por medio de la relación

entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado en el mismo, para cada una de las técnicas aeróbicas. Como se mencionó anteriormente, en el proceso de tratamiento biológico es necesario suplir oxígeno por absorción forzada de la atmósfera o por inyección de aire en el medio líquido. Se estudiaron las técnicas de inyección de aire por difusores de burbuja fina y burbuja gruesa, y por medio del aireador Venturi Jet. La profundidad de cada tanque de aireación era aproximadamente de 4 metros.

De la misma forma que los parámetros anteriores, se realizaron siete corridas de toma de muestra. Se midió el oxígeno disuelto en el agua residual a la entrada del tanque de aireación y en el tanque de aireación; esto con el fin de lograr evaluar la eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) en el tanque de aireación. En la tabla XXVI de la sección de resultados, se muestran los valores promedios de porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno, para cada una de las plantas. Puede observarse que la PTAR que presenta el mayor SOTE es la de burbuja fina con un valor de 37.67%, seguida de la PTAR de Venturi Jet con un valor de 25.85%, y por último la de burbuja gruesa con un valor de 15.14%. El SOTE expresa la cantidad de oxígeno absorbido por metro cúbico de aire aplicado.

Los difusores son dispositivos que consiguen la transferencia de aire mediante la producción de una gran cantidad de burbujas, generadas como consecuencia de hacer pasar aire a presión mediante un soplante a través de medios porosos o a través de toberas especiales. El aireador Venturi Jet, genera un chorro de agua con un tamaño de burbuja fina o media. Lo que se busca es realizar una transferencia de oxígeno al agua por medio del aire, ya que inyectar oxígeno puro es una opción demasiado costosa.

La inclusión de burbujas de aire en el fluido es una importante ayuda en el proceso de mezcla, ya que estas se unen a las partículas en suspensión, con lo cual se logra que la velocidad de sedimentación disminuya y se consigue una agitación más completa.

La PTAR de burbuja fina presenta el mayor valor de porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) debido a que las burbujas finas brindan un buen contacto aire-agua, ya que proporcionan una mayor área superficial de contacto, posibilitando así, elevadas transferencias de oxígeno. Por otra parte, en los difusores de burbuja gruesa, el tamaño de burbuja es superior, por lo que la superficie de contacto aire-agua es inferior y por tanto, la transferencia de oxígeno al líquido disminuye. Cabe mencionar, que el valor de SOTE aumenta con la profundidad a la que se encuentren los difusores; debido a que la burbuja de aire busca salir a la superficie; por lo tanto, si la burbuja recorre una mayor distancia, ésta tendrá un mayor tiempo de contacto aire-agua.

La eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) de los difusores porosos disminuye con el uso, debido a la colmatación interna o externa. La colmatación interna es debida a las impurezas del aire, no removidas en el filtro. La colmatación externa es debida al crecimiento bacteriano en la superficie, o a la precipitación de compuestos inorgánicos.

Por último se realizó un análisis de varianzas, conocido como ANOVA para efectuar una comparación entre las tres técnicas aeróbicas estudiadas, de acuerdo a la eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación.

Como hipótesis nula e hipótesis alterna, se plantearon:

H_0 : La transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de acuerdo a la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado, no difiere de la técnica aeróbica que se utilice.

Hipótesis alterna:

H_a : La transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de acuerdo a la relación entre la masa de oxígeno transferido y la masa de oxígeno suministrado, difiere de la técnica aeróbica que se utilice.

Al realizar el método ANOVA, se obtuvo como dato final, que se rechazaba la hipótesis nula al nivel de significación de 0.05. Luego se procedió a realizar el procedimiento de Tukey, para determinar que técnica difería de cual otra. Al realizar este procedimiento, se llegó a la conclusión, que las tres técnicas difieren una de la otra, de acuerdo al porcentaje de eficiencia tanto en la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, como en el porcentaje de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos estudiados.

Cabe mencionar, que la calidad del efluente, respecto a los parámetros fisicoquímicos sanitarios estudiados, de las tres plantas de tratamiento de agua residual domiciliar cumplen con lo establecido en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de Guatemala: "Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos", el cual se tomó como referencia para realizar el presente estudio.

6. LOGROS OBTENIDOS

1. Evaluación del porcentaje de remoción de los principales parámetros fisicoquímicos sanitarios, tales como: DBO₅, DQO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, sólidos disueltos, sólidos totales, nitrógeno total y fósforo total, en cada una de las plantas de tratamiento de agua residual estudiadas.
2. Evaluación del porcentaje de eficiencia en la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación de acuerdo a la relación entre el oxígeno transferido y el oxígeno suministrado.
3. Conocimiento del proceso de lodos activados en modalidad de aireación extendida, y las diferencias que este presenta respecto al método de lodos activados convencionales.
4. Conocimiento de las ventajas y desventajas que presentan cada técnica aeróbica estudiada.
5. Transferencia de conocimientos adquiridos al personal de la división de tratamiento de agua y filtración de la empresa en donde se desarrolló el proyecto de Ejercicio Profesional Supervisado (EPS).

CONCLUSIONES

1. La planta de tratamiento de agua residual domiciliar que presenta el mayor porcentaje de remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) es la de burbuja fina, con un valor de 91.20%.
2. El mayor porcentaje de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) es de 87.25%, obtenida con la PTAR de burbuja fina.
3. La planta de tratamiento de agua residual domiciliar que presenta el mayor porcentaje de remoción de sólidos totales, es la de burbuja fina, con un valor de 38.83%.
4. La remoción de los sólidos sedimentables fue del 100% en las tres PTAR.
5. El mayor porcentaje de remoción de sólidos suspendidos fue de 82.57%, la PTAR de burbuja fina.
6. En las tres plantas de tratamiento estudiadas, se presentó un incremento de concentración de nitrógeno total en el efluente, con valores promedio de 19.05% para la de burbuja fina, 4.41% para la de burbuja gruesa, y 9.49% para la de aireador Venturi Jet.
7. Tanto para la planta de burbuja gruesa, como para la del aireador Venturi Jet, se presentó un incremento de concentración de fósforo total en el efluente, con valores promedios de 273.59% y 53.51% respectivamente.

8. La técnica aeróbica que presenta el mayor porcentaje de eficiencia de transferencia de oxígeno (SOTE) en el tanque de aireación es la de burbuja fina, con un valor de 37.67%.
9. La técnica de aireación de burbuja fina, es la más eficiente debido a que menor tamaño de la burbuja, se presenta una mayor área de contacto entre aire-agua.
10. De acuerdo al procedimiento de Tukey realizado con un nivel de confianza de 95%, puede decirse que la eficiencia de transferencia de oxígeno en el tanque de aireación, si difiere de la técnica aeróbica que se utilice.

RECOMENDACIONES

1. La caracterización del agua residual debe realizarse antes de iniciar el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, ya que estos datos serán de suma importancia, para el buen funcionamiento de la planta, debido a que los procesos biológicos dependen directamente de estos valores.
2. Realizar la caracterización del afluente y efluente, periódicamente, para observar el comportamiento y evolución de la planta de tratamiento de aguas residuales.
3. Los soplantes deben ser elegidos de acuerdo a la caracterización del afluente, para asegurar que el equipo proporcione la cantidad de aire requerido en todo el proceso.
4. Monitorear el pH y el oxígeno disuelto en el tanque de aireación para verificar que en el mismo, exista una concentración mínima de 2 mg/l de oxígeno disuelto y un valor de pH entre 6.5-8, para la sobrevivencia de los microorganismos.
5. Elaborar manual de operación de la planta de tratamiento, de fácil entendimiento para los operadores de la misma, en el cual se indiquen los procedimientos y cuidados que deben seguirse.

6. Se propone que otro estudiante realice el estudio del comportamiento del nitrógeno y fósforo dentro de una planta de tratamiento de agua residual domiciliar por lodos activados con aireación extendida, ya que la concentración de los mismos en el efluente, presentaron un incremento.

7. En el tanque de aireación de las PTAR que utilizan el aireador Venturi Jet, se recomienda colocar mamparas en las esquinas del tanque, para mejorar la mezcla dentro del tanque, y así lograr aumentar la eficiencia de transferencia de oxígeno dentro del mismo.

8. Se propone que un estudiante de postgrado determine el coeficiente de transferencia de oxígeno para cada técnica aeróbica, presentada en este trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Texto

1. Crites, Ron y George Tchobanoglous. **Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones**. Trad. Miller Camargo y otros. Colombia: Editorial McGraw-Hill, 2000.
2. Devore, Jay L. **Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias**. 6ª ed. México: Editorial Thomson, 2005.
3. Fair, Gordon Maskew y otros. **Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales**. (Volumen II). México: Editorial Limusa-Wiley, S.A., 1971.
4. Hillboe, Herman. **Manual de tratamiento de aguas negras**. México: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 1989.
5. Metcalf y Eddy. **Ingeniería de las aguas residuales**. Trad. Juan de Dios Trillo Montsoriu. 2ª ed. España: Editorial McGraw-Hill, 1995.

2. Referencias electrónicas

6. Depuración de aguas residuales. Lodos activados.
http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/Seminarios_Varios/ERAR_texto.htm. 25 de marzo, 2009.
7. Manual de equipo de aireación ABS. Manual de aireación ABS – NOPOL. <http://www.absgroup.com/en/> 25 de marzo, 2009.

8. Tamaño de muestra. Pita Fernández, S. **Determinación del tamaño muestral.** <http://www.fisterra.com/mbe/investiga/9muestras/9muestras.asp>. 5 de marzo, 2010.

BIBLIOGRAFÍA

1. Texto

1. Barnes, George. **Tratamiento de aguas negras y desechos industriales**. 1ª ed. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1967.
2. Klée, Oscar. **Estadística**. 7ª ed. Guatemala: Editorial Kamar S.A., 1997.
3. Pacheco Jordao, Eduardo y Constantino Arruda. **Tratamiento de esgotos domésticos**. 4ª ed. Río de Janeiro, 2005.

2. Referencias electrónicas

4. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, Guatemala. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacq/e/cd-cagua/normas/lac/10.GTM/acuerdo.pdf> 18 de marzo, 2009.
5. Cámara, Lesly Da y otros. Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias. Tratamiento de aguas residuales. http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/manual_tratamiento.pdf 25 de marzo, 2009.
6. Normas ISO 690-1987 y 690-2. <http://www.bib.fcien.edu.uy/etd/pdf/iso690.pdf> 14 de mayo, 2009.
7. Tratamiento de aguas residuales. <http://www.geocities.com/RainForest/Canopy/1285/>. 28 de marzo, 2009.

APÉNDICE

Tabla A1. Concentración de oxígeno disuelto en agua como función de la temperatura y la presión barométrica

Concentración de oxígeno disuelto en agua como función de la temperatura y la presión barométrica (Salinidad=ppt)*										
T (°C)	Concentración de oxígeno disuelto, (mg/l)									
	Presión barométrica, milímetros de mercurio (mmHg)									
	735	740	745	750	755	760	765	770	775	780
0	14,12	14,22	14,31	14,41	14,51	14,60	14,70	14,80	14,89	14,99
1	13,73	13,82	13,92	14,01	14,10	14,20	14,29	14,39	14,48	14,57
2	13,36	13,45	13,54	13,63	13,72	13,81	13,90	14,00	14,09	14,18
3	13,00	13,09	13,18	13,27	13,36	13,45	13,53	13,62	13,71	13,80
4	12,66	12,75	12,83	12,92	13,01	13,09	13,18	13,27	13,35	13,44
5	12,33	12,42	12,50	12,59	12,67	12,76	12,84	12,93	13,01	13,10
6	12,02	12,11	12,19	12,27	12,35	12,44	12,52	12,60	12,68	12,77
7	11,72	11,80	11,89	11,97	12,05	12,13	12,21	12,29	12,37	12,45
8	11,44	11,52	11,60	11,67	11,75	11,83	11,91	11,99	12,07	12,15
9	11,16	11,24	11,32	11,40	11,47	11,55	11,63	11,70	11,78	11,86
10	10,90	10,98	11,05	11,13	11,20	11,28	11,35	11,43	11,50	11,58
11	10,65	10,72	10,80	10,87	10,94	11,02	11,09	11,16	11,24	11,31
12	10,41	10,48	10,55	10,62	10,69	10,77	10,84	10,91	10,98	11,05
13	10,17	10,24	10,31	10,38	10,46	10,53	10,60	10,67	10,74	10,81
14	9,95	10,02	10,09	10,16	10,23	10,29	10,36	10,43	10,50	10,57
15	9,73	9,80	9,87	9,94	10,00	10,07	10,14	10,21	10,27	10,34
16	9,53	9,59	9,66	9,73	9,79	9,86	9,92	9,99	10,06	10,12
17	9,33	9,39	9,46	9,52	9,59	9,65	9,72	9,78	9,85	9,91
18	9,14	9,20	9,26	9,33	9,39	9,45	9,52	9,58	9,64	9,71
19	8,95	9,01	9,07	9,14	9,20	9,26	9,32	9,39	9,45	9,51
20	8,77	8,83	8,89	8,95	9,02	9,08	9,14	9,20	9,26	9,32
21	8,60	8,66	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,02	9,08	9,14
22	8,43	8,49	8,55	8,61	8,67	8,73	8,79	8,84	8,90	8,96
23	8,27	8,33	8,39	8,44	8,50	8,56	8,62	8,68	8,73	8,79
24	8,11	8,17	8,23	8,29	8,34	8,40	8,46	8,51	8,57	8,63
25	7,96	8,02	8,08	8,13	8,19	8,24	8,30	8,36	8,41	8,47

26	7,82	7,87	7,93	7,98	8,04	8,09	8,15	8,20	8,26	8,31
27	7,68	7,73	7,79	7,84	7,89	7,95	8,00	8,06	8,11	8,17
28	7,54	7,59	7,65	7,70	7,75	7,81	7,86	7,91	7,97	8,02
29	7,41	7,46	7,51	7,57	7,62	7,67	7,72	7,78	7,83	7,88
30	7,28	7,33	7,38	7,44	7,49	7,54	7,59	7,64	7,69	7,75
31	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,46	7,51	7,56	7,62
32	7,04	7,09	7,14	7,19	7,24	7,29	7,34	7,39	7,44	7,49
33	6,92	6,97	7,02	7,07	7,12	7,17	7,22	7,27	7,31	7,36
34	6,80	6,85	6,90	6,95	7,00	7,05	7,10	7,15	7,20	7,24
35	6,69	6,74	6,79	6,84	6,89	6,93	6,98	7,03	7,08	7,13
36	6,59	6,63	6,68	6,73	6,78	6,82	6,87	6,92	6,97	7,01
37	6,48	6,53	6,57	6,62	6,67	6,72	6,76	6,81	6,86	6,90
38	6,38	6,43	6,47	6,52	6,56	6,61	6,66	6,70	6,75	6,80
39	6,28	6,33	6,37	6,42	6,46	6,51	6,56	6,60	6,65	6,69
40	6,18	6,23	6,27	6,32	6,36	6,41	6,46	6,50	6,55	6,59
*ppt=partes por mil										

Fuente: Apéndice E, Tabla E.2. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Ron Crites

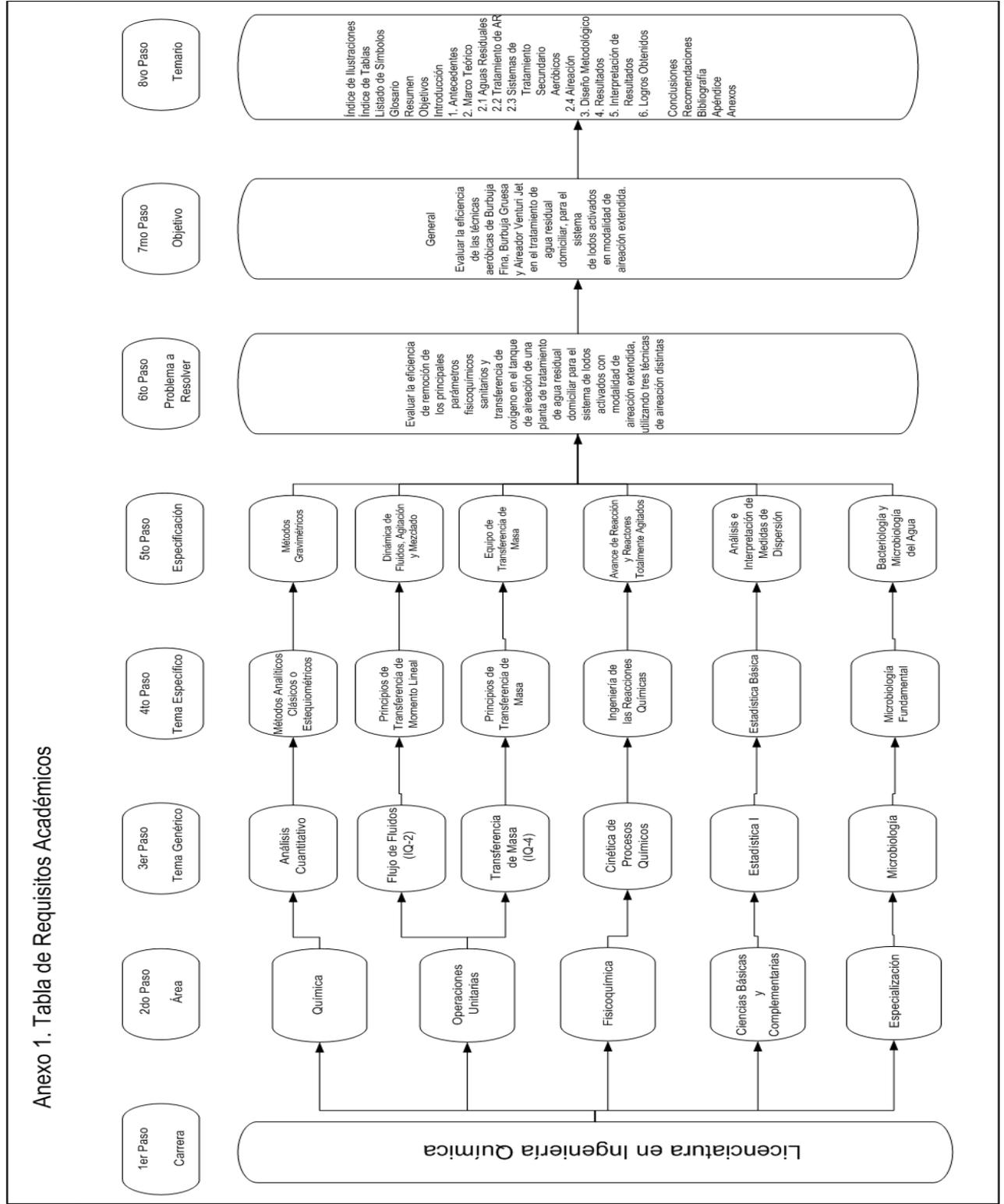
Tabla A2. Valores de capacidad de oxigenación y coeficiente α

Sistema de Aireación Tipo de Difusores	Capacidad de Oxigenación Kg O ₂ /kW·h	Coeficiente α
• De burbujas gruesas	0.75-1.20	0.90-1.30
• De burbujas medias	1.00-1.50	0.70-0.90
• De burbujas finas		
○ Tubos cerámico porosos	1.40-2.10	0.60-0.85
○ Domos o discos cerámico porosos	3.00-4.00	0.40-0.70
• Aireadores mecánicos superficiales	1.20-2.40	0.80-1.20

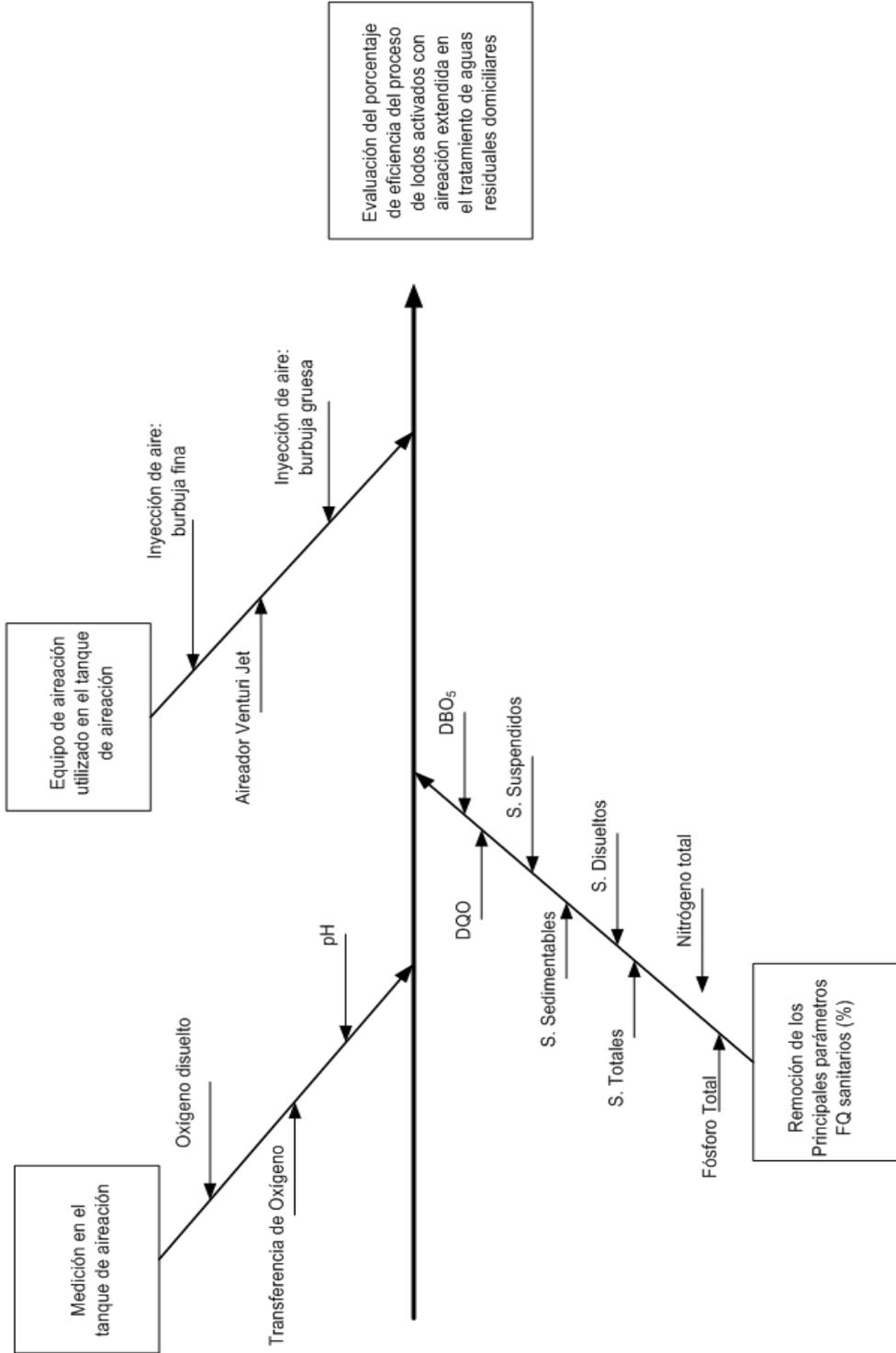
Fuente: Tratamiento de esgotos domésticos. Eduardo Pacheco Jordão - Constantino Aruda Pessôa

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de Requisitos Académicos



Anexo 2. Diagrama de Ishikawa



ANEXO 3

Acuerdo Gubernativo No. 236-2006, Guatemala. Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos.

ACUERDO GUBERNATIVO No. 236-2006

Guatemala, 5 de Mayo de 2006

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

CONSIDERANDO:

Que por imperativo constitucional el Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga el impacto adverso del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico; para lo cual es necesario dictar normas que garanticen la utilización y el aprovechamiento racional de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, evitando su depredación.

CONSIDERANDO:

Que la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, tiene por objeto velar por el mantenimiento del equilibrio ecológico y la calidad del medio ambiente para mejorar la calidad de vida de los habitantes del país.

CONSIDERANDO:

Que de conformidad con la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, el Gobierno debe emitir las disposiciones y reglamentos correspondientes, para ejercer el control, aprovechamiento y uso de las aguas; prevenir, controlar y determinar los niveles de contaminación de los ríos, lagos y mares y cualquier otra causa o fuente de contaminación hídrica.

CONSIDERANDO:

Que es importante contar con un instrumento normativo moderno que ofrezca certeza jurídica para la inversión, permita la creación de empleo, propicie el mejoramiento progresivo de la calidad de las aguas y contribuya a la sostenibilidad del recurso hídrico; coordinando para el efecto los esfuerzos de los órganos de la administración pública con las municipalidades y la sociedad civil.

POR TANTO:

En uso de las funciones que le confieren el artículo 183, literal e) de la Constitución Política de la República de Guatemala,

ACUERDA:

Emitir el siguiente

**“REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES
Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS”**

CAPÍTULO I

DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1. OBJETO. El objeto del presente Reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reuso de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Lo anterior para que, a través del mejoramiento de las características de dichas aguas, se logre establecer un proceso continuo que permita:

- a) Proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana.
- b) Recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización.
- c) Promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada.

También es objeto del presente Reglamento establecer los mecanismos de evaluación, control y seguimiento para que el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales promueva la conservación y mejoramiento del recurso hídrico.

Artículo 2. APLICACIÓN. El presente Reglamento debe aplicarse a:

- a) Los entes generadores de aguas residuales;
- b) Las personas que descarguen sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público;
- c) Las personas que produzcan aguas residuales para reuso;
- d) Las personas que reusen parcial o totalmente aguas residuales; y
- e) Las personas responsables del manejo, tratamiento y disposición final de lodos.

Artículo 3. COMPETENCIA. Compete la aplicación del presente Reglamento al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Las Municipalidades y demás instituciones de gobierno, incluidas las descentralizadas y autónomas, deberán hacer del conocimiento de dicho Ministerio los hechos contrarios a estas disposiciones, para los efectos de la aplicación de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.

CAPÍTULO II

DEFINICIONES

Artículo 4. DEFINICIONES. Para los efectos de la aplicación e interpretación de este Reglamento, se entenderá por:

AFLUENTE: el agua captada por un ente generador.

AGUAS RESIDUALES: las aguas que han recibido uso y cuyas calidades han sido modificadas.

AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL: las aguas residuales generadas por servicios públicos municipales y actividades de servicios, industriales, agrícolas, pecuarias, hospitalarias y todas aquellas que no sean de tipo ordinario, así como la mezcla de las mismas.

AGUAS RESIDUALES DE TIPO ORDINARIO: las aguas residuales generadas por las actividades domésticas, tales como uso en servicios sanitarios, pilas, lavamanos, lavatrastos, lavado de ropa y otras similares, así como la mezcla de las mismas, que se conduzcan a través de un alcantarillado.

ALCANTARILLADO PLUVIAL: el conjunto de tuberías, canalizaciones y obras accesorias para recolectar y conducir las aguas de lluvia.

ALCANTARILLADO PÚBLICO: el conjunto de tuberías y obras accesorias utilizadas por la municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial, o combinación de ambas que deben ser previamente tratadas antes de descargarlas a un cuerpo receptor.

CARACTERIZACIÓN DE UNA MUESTRA: la determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

CARACTERIZACIÓN DE UN EFLUENTE O UN AFLUENTE: la determinación de características físicas, químicas y biológicas de las aguas, incluyendo caudal, de los parámetros requeridos en el presente Reglamento.

CARGA: el resultado de multiplicar el caudal por la concentración determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.

CAUDAL: el volumen de agua por unidad de tiempo.

COLIFORMES FECALES: el parámetro que indica la presencia de contaminación fecal en el agua y de bacterias patógenas, provenientes del tracto digestivo de los seres humanos y animales de sangre caliente.

CUERPO RECEPTOR: embalse natural, lago, laguna, río, quebrada, manantial, humedal, estuario, estero, manglar, pantano, aguas costeras y aguas subterráneas donde se descargan aguas residuales.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO: la medida indirecta del contenido de materia orgánica en aguas residuales, que se determina por la cantidad de oxígeno utilizado en la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable durante un período de cinco días y una temperatura de veinte grados Celsius.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO: la medida indirecta del contenido de materia orgánica e inorgánica oxidable en aguas residuales, que se determina por la cantidad equivalente de oxígeno utilizado en la oxidación química.

DILUCION: el proceso que consiste en agregar un volumen de agua con el propósito de disminuir la concentración en un efluente de aguas residuales.

EFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES: las aguas residuales descargadas por un ente generador.

ENTES GENERADORES: la persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, y cuyo efluente final se descarga a un cuerpo receptor.

ENTES GENERADORES EXISTENTES: los entes generadores establecidos previo a la vigencia del presente Reglamento.

ENTES GENERADORES NUEVOS: los entes generadores establecidos posteriormente a la vigencia del presente Reglamento.

ESTABILIZACIÓN DE LODOS: el proceso físico, químico o biológico al que se someten los lodos para acondicionarlos previo a su aprovechamiento o disposición final.

ESTERO: la zona del litoral que se inunda durante la pleamar. Puede ser tanto arenoso como rocoso y en ocasiones alcanza gran amplitud, tanto mayor cuanto más leve sea la pendiente y más notorias las mareas. Con frecuencia tiene un amplio desarrollo en las desembocaduras fluviales.

EUTROFIZACIÓN: el proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

FERTIRRIEGO: la práctica agrícola que permite el reuso de un efluente de aguas residuales, que no requiere tratamiento, a fin de aprovechar los diversos nutrientes que posee para destinarlos en la recuperación y mejoramiento de suelos así como en fertilización de cultivos que no se consuman crudos o precocidos.

HUMEDAL: el sistema acuático natural o artificial, de agua dulce o salada, de carácter temporal o permanente, generalmente en remanso y de poca profundidad.

INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN AMBIENTAL: los documentos técnicos definidos en el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, Acuerdo Gubernativo No. 23-2003 y sus reformas, contenidos en los Acuerdos Gubernativos No. 424-2003 y 704-2003; los cuales permiten realizar una identificación y evaluación sistemática de los impactos ambientales de un proyecto, obra, industria o cualquier otra actividad, desde la fase de construcción hasta la fase de abandono.

LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE: el valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reuso y lodos.

LODOS: los sólidos con un contenido variable de humedad provenientes del tratamiento de aguas residuales.

MANTO FREÁTICO: la capa de roca subterránea, porosa y fisurada que actúa como reservorio de aguas que pueden ser utilizables por gravedad o por bombeo.

META DE CUMPLIMIENTO: la determinación numérica de los valores que deben alcanzarse en la descarga de aguas residuales al final de cada etapa de cumplimiento. En el caso de los entes generadores nuevos y de las personas nuevas que descargan al alcantarillado público, al iniciar operaciones.

MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA: el régimen de cumplimiento de valores de parámetros en cargas, con parámetro de calidad asociado, en distintas etapas.

MONITOREO: el proceso mediante el cual se obtienen, interpretan y evalúan los resultados de una o varias muestras, con una frecuencia de tiempo determinada, para establecer el comportamiento de los valores de los parámetros de efluentes, aguas para reuso y lodos.

MUESTRA: la parte representativa, a analizar, de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

MUESTRAS COMPUESTAS: dos o más muestras simples que se toman en intervalos determinados de tiempo y que se adicionan para obtener un resultado de las características de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos.

MUESTRA SIMPLE: la muestra tomada en una sola operación que representa las características de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos en el momento de la toma.

PARÁMETRO: la variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reuso o lodos, asignándole un valor numérico.

PARÁMETRO DE CALIDAD ASOCIADO: el valor de concentración de demanda bioquímica de oxígeno, expresado en miligramos por litro, que determina la condición del efluente y se aplica en el modelo de reducción progresiva de cargas.

PERSONA QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO: la persona individual o jurídica, pública o privada, que descarga aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público.

PERSONA EXISTENTE QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO: la persona que descarga al alcantarillado público establecida previo a la vigencia del presente Reglamento.

PERSONA NUEVA QUE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO: la persona que descarga al alcantarillado público establecida posteriormente a la vigencia del presente Reglamento.

PUNTO DE DESCARGA: el sitio en el cual el efluente de aguas residuales confluye en un cuerpo receptor o con otro efluente de aguas residuales.

REUSO: el aprovechamiento de un efluente, tratado o no.

SERVICIOS PÚBLICOS MUNICIPALES: aquellos que, de acuerdo con el Código Municipal, prestan las municipalidades directamente o los concesionan y que generan aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas.

SISTEMA DE ALCANTARILLADO PRIVADO: el conjunto de tuberías y obras accesorias para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo especial, originadas por distintas personas individuales o jurídicas privadas, hasta su disposición a una planta de tratamiento de aguas residuales privada.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES: cualquier proceso físico, químico, biológico o una combinación de los mismos, utilizado para mejorar las características de las aguas residuales.

CAPÍTULO III

ESTUDIO TÉCNICO

Artículo 5. ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas o no a un cuerpo receptor o al alcantarillado público tendrán la obligación de preparar un estudio avalado por técnicos en la materia a efecto de caracterizar efluentes, descargas, aguas para reuso y lodos.

Artículo 6. CONTENIDO DEL ESTUDIO TÉCNICO. Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas, indicadas en el artículo 5 del presente Reglamento, para documentar el estudio técnico deberán tomar en cuenta los siguientes requisitos:

- I. Información general:
 - a) Nombre, razón o denominación social.
 - b) Persona contacto ante el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
 - c) Descripción de la naturaleza de la actividad de la persona individual o jurídica sujeta al presente Reglamento.
 - d) Horarios de descarga de aguas residuales.
 - e) Descripción del tratamiento de aguas residuales.
 - f) Caracterización del efluente de aguas residuales, incluyendo sólidos sedimentables.
 - g) Caracterización de las aguas para reuso.
 - h) Caracterización de lodos a disponer.
 - i) Caracterización del afluente. Aplica en el caso de la deducción especial de parámetros del artículo 23 del presente Reglamento.
 - j) Identificación del cuerpo receptor hacia el cual se descargan las aguas residuales, si aplica.
 - k) Identificación del alcantarillado hacia el cual se descargan las aguas residuales, si aplica.
 - l) Enumeración de parámetros exentos de medición y su justificación respectiva.
- II. Documentos:
 - a) Plano de localización y ubicación, con coordenadas geográficas, del ente generador o de la persona que descarga aguas residuales al alcantarillado público.
 - b) Plano de ubicación y localización, con coordenadas geográficas, del o los dispositivos de descarga, para la toma de muestras, tanto del afluente como del efluente. En el caso del afluente cuando aplique.
 - c) Plan de gestión de aguas residuales, aguas para reuso y lodos. Las municipalidades o empresas encargadas de prestar el servicio de tratamiento de aguas residuales, a personas que descargan sus aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, incluirán la siguiente información: el catastro de dichos usuarios y el monitoreo de sus descargas.
 - d) Plan de tratamiento de aguas residuales, si se descargan a un cuerpo receptor o alcantarillado.
 - e) Informes de resultados de las caracterizaciones realizadas.

Artículo 7. RESGUARDO DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica conservará el Estudio Técnico, manteniéndolo a disposición de las autoridades del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales cuando se lo requieran por razones de seguimiento y evaluación.

Artículo 8. INSTRUMENTOS DE EVALUACIÓN, CONTROL Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL. Para los efectos del cumplimiento del artículo 97 del Código de Salud, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales al aprobar un Instrumento de Evaluación Ambiental a los entes generadores nuevos, incluirá en la resolución el dictámen relacionado con la descarga de aguas residuales de conformidad con lo establecido en el presente Reglamento.

Para efectos de verificación y control del cumplimiento de este Reglamento, el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales deberá utilizar los Instrumentos contenidos en el Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental.

Artículo 9. PLAZO PARA LA EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO Y CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales deberá evaluar en forma permanente el desempeño ambiental y el cumplimiento de los planes contemplados en el numeral II Documentos, literales c) y d) del artículo 6.

Artículo 10. VIGENCIA DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas deberá, cada cinco años, actualizar el contenido del estudio técnico estipulado en el presente Reglamento.

Artículo 11. AMPLIACION DEL ESTUDIO TÉCNICO. En caso de que las autoridades del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales determinen que la información del artículo 6 se puede fortalecer adicionando datos, justificará por escrito su requerimiento.

Artículo 12. EXENCIÓN DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS. La exención de medición de parámetros procederá cuando se demuestre a través del Estudio al que se refiere el artículo 5 del presente Reglamento, que por las características del proceso productivo no se generan algunos de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, aplicables a descarga de aguas residuales, reuso de aguas residuales y lodos.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN

Artículo 13. CARACTERIZACIÓN DEL AFLUENTE Y DEL EFLUENTE DE AGUAS RESIDUALES. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas en un cuerpo receptor o al alcantarillado público, deberá realizar la caracterización del afluente, así como del efluente de aguas residuales e incluir los resultados en el estudio técnico.

Artículo 14. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS PARA REUSO. La persona individual o jurídica, pública o privada, que genere aguas residuales para reuso o las reuse, deberá realizar la caracterización de las aguas que genere y que desea aprovechar e incluir el resultado en el estudio técnico.

Artículo 15. CARACTERIZACIÓN DE LODOS. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar lodos, deberá realizar la caracterización de los mismos e incluir el resultado en el estudio técnico.

CAPÍTULO V

PARÁMETROS PARA AGUAS RESIDUALES Y VALORES DE DESCARGA A CUERPOS RECEPTORES

Artículo 16. PARÁMETROS DE AGUAS RESIDUALES. Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales son los siguientes:

- a) Temperatura,
- b) Potencial de hidrógeno,
- c) Grasas y aceites,
- d) Materia flotante,
- e) Sólidos suspendidos totales,
- f) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius,
- g) Demanda química de oxígeno,
- h) Nitrógeno total,

- i) Fósforo total,
- j) Arsénico,
- k) Cadmio,
- l) Cianuro total,
- m) Cobre,
- n) Cromo hexavalente,
- o) Mercurio,
- p) Níquel,
- q) Plomo,
- r) Zinc,
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Artículo 17. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO. Los entes generadores existentes deberán reducir en forma progresiva la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas residuales que descarguen a un cuerpo receptor, conforme a los valores y etapas de cumplimiento del cuadro siguiente:

Etapas	Uno				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	50000≤EG<250000
Reducción porcentual	10	20	30	35	50
Etapas	Dos				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	50000≤EG<125000
Reducción porcentual	10	20	40	45	50
Etapas	Tres				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<65000	
Reducción porcentual	50	70	85	90	
Etapas	Cuatro				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000			4000≤EG<7000	
Reducción porcentual	40			60	

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico. Dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno, se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

Artículo 18. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO. Los entes generadores, en el Estudio Técnico, deberán incluir la determinación de la demanda química de oxígeno, a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 19. META DE CUMPLIMIENTO. La meta de cumplimiento, al finalizar las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas, se establece en tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. Los entes generadores existentes que alcancen y mantengan éstos valores habrán cumplido con la meta establecida en este artículo y con el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17 del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, pero que registren valores mayores a doscientos miligramos por litro en el parámetro de calidad asociado, procederán a efectuar la reducción del valor de dicho parámetro de conformidad con los porcentajes correspondientes a la primera columna del lado izquierdo correspondiente a los rangos, en el modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 17, del presente Reglamento.

Los entes generadores existentes de aguas residuales de tipo especial y ordinario que después de tratar dichas aguas, y que en cualesquiera de las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas alcancen y mantengan valores en el parámetro de calidad asociado, iguales o menores que cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 20. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A CUERPOS RECEPTORES. Los límites máximos permisibles de los parámetros para las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores son:

			Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^6$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Artículo 21. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA ENTES GENERADORES NUEVOS. Los entes generadores nuevos deberán cumplir, desde el inicio de sus operaciones, con una meta de tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno, con un parámetro de calidad asociado igual o menor que doscientos miligramos por litro de demanda bioquímica de oxígeno. En el caso de que el parámetro de calidad asociado sea igual o menor a cien miligramos por litro en la demanda bioquímica de oxígeno, podrán realizar descargas mayores a tres mil kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno.

Adicionalmente, deberán cumplir los límites máximos permisibles de los parámetros siguientes:

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	20
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

TCR = temperatura del cuerpo receptor, en grados Celsius.

Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente se requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, el ente generador deberá cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en el presente artículo.

El ente generador nuevo que, por razones técnicas debidamente justificadas, requiera de un período de estabilización productiva, definirá en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental la necesidad y etapas de ajuste consecutivas dentro del período de estabilización, el cual no excederá de seis meses, contados a partir del inicio de operaciones del ente generador. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, establecerá en la resolución aprobatoria del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, el plazo o plazos consecutivos de las etapas que fueren necesarias para dicho período de estabilización.

Artículo 22. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES EN ESTEROS. Cuando el cuerpo receptor sea un estero se aplicarán las siguientes disposiciones:

- a) Los entes generadores existentes deberán observar los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 20 del presente Reglamento. El parámetro de demanda bioquímica de oxígeno aplicable es el siguiente:

Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	500	300	250	150	100

- b) Los entes generadores nuevos deberán aplicar los límites máximos permisibles y la reducción de la última etapa del artículo 20 y del artículo 22 literal a).
- c) Para los entes generadores que descargan aguas residuales de tipo especial a esteros, los valores de las concentraciones de los parámetros establecidos en el presente Reglamento, se determinan de acuerdo a la diferencia entre la concentración del efluente y la del afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles de los artículos 20 y 22 literal a) del presente Reglamento.
- d) A los entes generadores regulados en el presente artículo no les serán aplicables los artículos 17 y 19, del presente Reglamento.

Artículo 23. DEDUCCIÓN ESPECIAL DE VALORES EN PARÁMETROS. A los entes generadores de aguas residuales de tipo especial que registren en sus afluentes valores mayores a los límites máximos permisibles de los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, se aplicará el concepto de deducción especial. Dicha deducción especial consiste en restar el valor de cada parámetro del efluente del valor registrado en el afluente. El resultado que se obtenga se utilizará como base para establecer si el ente generador cumple con los límites máximos permisibles del presente Reglamento.

Artículo 24. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS A CUERPOS RECEPTORES PARA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES Y DE URBANIZACIONES NO CONECTADAS AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las municipalidades o empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público y las urbanizaciones existentes no conectadas al alcantarillado público, cumplirán con los límites máximos permisibles para descargar a cuerpos receptores, de cualesquiera de las formas siguientes:

- a) Con lo preceptuado en los artículos 17, 18, 19 y 20, de conformidad con los plazos establecidos en estos artículos del presente Reglamento.

b) Con los límites máximos permisibles y plazos establecidos en el siguiente cuadro:

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro	Dos de mayo de dos mil veintinueve
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	100	50	10	10	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	700	250	100	100	100
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	300	275	200	100	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	150	150	70	20	20
Fósforo total	Miligramos por litro	50	40	20	10	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^7$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	1	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	3	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.02	0.02	0.01	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	2	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	0.4	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1000	750	500	500

Todas las municipalidades deberán cumplir con tener en operación, por lo menos con sistemas de tratamiento primario al cumplirse a más tardar el dos de mayo del dos mil quince.

Las municipalidades que reciban descargas de aguas residuales de tipo especial en el alcantarillado público, que contengan compuestos que no puedan ser tratados en un sistema de tratamiento primario, no estarán sujetas a los límites máximos permisibles de demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, nitrógeno total y fósforo total en la etapa uno del cuadro anterior, del presente artículo, lo cual deberá ser acreditado en el Estudio Técnico.

La anterior disposición no exime a las municipalidades de cumplir con límites máximos permisibles de los parámetros del párrafo anterior en las etapas subsiguientes.

CAPÍTULO VI

PARÁMETROS PARA AGUAS RESIDUALES Y VALORES DE DESCARGA AL ALCANTARILLADO PÚBLICO

Artículo 25. PARÁMETROS. Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales vertidas al alcantarillado público son los siguientes:

- a) Temperatura,
- b) Potencial de hidrógeno,
- c) Grasas y aceites,
- d) Materia flotante,

- e) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius,
- f) Demanda química de oxígeno,
- g) Sólidos suspendidos totales,
- h) Nitrógeno total,
- i) Fósforo total,
- j) Arsénico,
- k) Cadmio,
- l) Cianuro total,
- m) Cobre,
- n) Cromo hexavalente,
- o) Mercurio,
- p) Níquel,
- q) Plomo,
- r) Zinc,
- s) Color y
- t) Coliformes fecales.

Artículo 26. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO PARA DESCARGAS AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las personas existentes que descargan al alcantarillado público deberán reducir en forma progresiva la demanda bioquímica de oxígeno, conforme a los valores y las etapas de cumplimiento del cuadro siguiente:

Etapa	Uno				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil once				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<6000	6000≤EG<12000	12000≤EG<25000	25000≤EG<50000	50000≤EG<250000
Reducción porcentual	10	20	30	35	50
Etapa	Dos				
Duración, años	4				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil quince				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5500	5500≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<50000	50000≤EG<125000
Reducción porcentual	10	20	40	45	50
Etapa	Tres				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinte				
Duración, años	5				
Carga, kilogramos por día	3000≤EG<5000	5000≤EG<10000	10000≤EG<30000	30000≤EG<65000	
Reducción porcentual	50	70	85	90	
Etapa	Cuatro				
Fecha máxima de cumplimiento	Dos de mayo de dos mil veinticuatro				
Duración, años	4				
Carga, kilogramos por día	3000<EG<4000		4000≤EG<7000		
Reducción porcentual	40		60		

EG = carga del ente generador correspondiente, en kilogramos por día.

Las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público y que registren cargas menores o iguales a tres mil kilogramos por día, deben continuar con la reducción de la carga, hasta alcanzar el parámetro de valor asociado de cada etapa.

Para efectos de la aplicación del presente modelo, el valor inicial de descarga estará determinado en el Estudio Técnico; dicho valor inicial, se refiere a la carga expresada en kilogramos por día de demanda bioquímica de oxígeno. Para los porcentajes de reducción de la etapa uno se utilizará el valor inicial de descarga del Estudio Técnico y para cada una de las etapas siguientes, la carga inicial será el resultado obtenido de la reducción porcentual de la etapa anterior.

Artículo 27. PARÁMETRO DE CALIDAD ASOCIADO DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO. Las personas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, deben cumplir con las etapas del modelo de reducción progresiva de cargas del artículo 26 y con los valores del parámetro de calidad asociado de demanda bioquímica de oxígeno, que se presentan en el siguiente cuadro:

Parámetro	Dimensional	Valor inicial	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	3500	1500	750	450	200

Artículo 28. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Para la descarga de las aguas residuales de tipo especial hacia un alcantarillado público, se deberá cumplir con los límites máximos permisibles de conformidad con las etapas de cumplimiento correspondientes establecidos en el cuadro siguiente:

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	200	100	60	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	1500	700	400	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	180	150	80	40
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	40	20	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁸	< 1x10 ⁶	< 1x10 ⁵	< 1x10 ⁴	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

Las personas que empleen colorantes no biodegradables en sus procesos productivos y que descarguen aguas residuales al alcantarillado público, deberán indicar en el estudio técnico los tratamientos utilizados para cumplir con los límites máximos permisibles de color en las etapas correspondientes, con el propósito de evitar su incorporación al cuerpo receptor.

Artículo 29. DETERMINACIÓN DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO PARA LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las personas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, deberán incluir en el Estudio Técnico a que se hace referencia en el artículo 5 del presente Reglamento, la determinación de la demanda química de oxígeno a efecto de establecer su relación con la demanda bioquímica de oxígeno, mediante la siguiente fórmula: demanda química de oxígeno dividido entre la demanda bioquímica de oxígeno.

Artículo 30. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA PERSONAS NUEVAS QUE DESCARGUEN AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Cuando de conformidad con lo establecido en el artículo 8 de la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, a las personas nuevas que descarguen aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, se les requiera un Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental, deberán cumplir con los valores de los límites máximos permisibles contenidos en el siguiente cuadro:

Parámetros	Dimensionales	Límites máximos permisibles
Temperatura	Grados Celsius	< 40
Grasas y aceites	Miligramos por litro	60
Materia flotante	Ausencia/presencia	Ausente
Demanda bioquímica de oxígeno	Miligramos por litro	200
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	200
Nitrógeno total	Miligramos por litro	40
Fósforo total	Miligramos por litro	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	< 1x10 ⁴
Arsénico	Miligramos por litro	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	1
Cobre	Miligramos por litro	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.01
Níquel	Miligramos por litro	2
Plomo	Miligramos por litro	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10
Color	Unidades platino cobalto	500

La persona que, por razones técnicas debidamente justificadas, requiera de un período de estabilización productiva, definirá en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental la necesidad y etapas de ajuste consecutivas dentro del período de estabilización, el cual no excederá de seis meses, contados a partir del inicio de operaciones del ente generador. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, establecerá en la resolución aprobatoria del Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental correspondiente, el plazo o plazos consecutivos de las etapas que fueren necesarias para dicho período de estabilización.

Artículo 31. OPCIONES DE CUMPLIMIENTO DE PARÁMETROS PARA LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES DE TIPO ESPECIAL AL ALCANTARILLADO PÚBLICO. Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que se encuentren autorizadas por la municipalidad para descargar aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, podrán cumplir los límites máximos permisibles de cualesquiera de las formas siguientes:

- a) Estableciendo sistemas de tratamiento propios.
- b) Pagando a la municipalidad o a las empresas encargadas del tratamiento de aguas residuales del alcantarillado público, una tasa correspondiente al servicio que se preste, siempre y cuando dichas municipalidades cuenten con sistema de tratamiento para aguas residuales en operación.

Se exceptúan de la opción de cumplimiento contenida en el inciso b) del presente artículo, las personas que descarguen aguas residuales con metales pesados cuyos límites máximos permisibles excedan de los valores establecidos en los artículos 28 y 30.

Artículo 32. EXENCIÓN DE PAGO POR SERVICIOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Las personas que descarguen sus aguas residuales al alcantarillado público, cumpliendo con los límites máximos permisibles de la literal b) del artículo 24 del presente Reglamento, estarán exentas de todo pago por los servicios de tratamiento de aguas residuales brindado por las Municipalidades o las concesionarias.

Artículo 33. CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE TARIFAS DE SERVICIO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. De acuerdo con lo establecido en el artículo 3 del Código Municipal, y para efectos de este Reglamento, las municipalidades coordinarán con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales la determinación de los criterios técnicos que servirán de base para establecer las tarifas del servicio de tratamiento de aguas residuales, para lo cual se tomará en cuenta como mínimo lo siguiente:

- a) Los costos de operación, mantenimiento, mejoramiento de calidad y cobertura de servicios.
- b) Los límites máximos permisibles establecidos en este Reglamento.
- c) Los estudios técnicos cuyos valores y caracterización sean conocidos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el que deba realizar la Municipalidad jurisdiccional.
- d) La tarifa será diferenciada atendiendo a las características de cada descarga.

Las Municipalidades establecerán las tarifas o tasas respectivas de conformidad con el propio Código Municipal.

CAPÍTULO VII

PARÁMETROS DE AGUAS PARA REUSO

Artículo 34. AUTORIZACIÓN DE REUSO. El presente Reglamento autoriza los siguientes tipos de reuso de aguas residuales, que cumplan con los límites máximos permisibles que a cada uso correspondan.

TIPO I: REUSO PARA RIEGO AGRÍCOLA EN GENERAL: uso de un efluente que debido a los nutrientes que posee se puede utilizar en el riego extensivo e intensivo, a manera de fertirriego, para recuperación y mejoramiento de suelos y como fertilizante en plantaciones de cultivos que, previamente a su consumo, requieren de un proceso industrial, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35. Se exceptúa de este reuso los cultivos considerados en el tipo II.

TIPO II: REUSO PARA CULTIVOS COMESTIBLES: con restricciones en el riego de áreas con cultivos comestibles que se consumen crudos o precocidos, como hortalizas y frutas. Para el caso de coliformes fecales y demanda bioquímica de oxígeno, deberá cumplirse de conformidad con los límites máximos permisibles del artículo 35. Adicionalmente, para otros parámetros, deberán cumplir los límites máximos permisibles presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento, a excepción de sólidos en suspensión, nitrógeno total y fósforo total.

TIPO III: REUSO PARA ACUACULTURA: uso de un efluente para la piscicultura y camaronicultura, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

TIPO IV: REUSO PARA PASTOS Y OTROS CULTIVOS: con restricciones en el riego de áreas de cultivos no alimenticios para el ser humano como pastos, forrajes, fibras, semillas y otros, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

TIPO V: REUSO RECREATIVO: con restricciones en el aprovechamiento para fines recreativos en estanques artificiales donde el ser humano sólo puede tener contacto incidental, incluido el riego en áreas verdes, donde el público tenga contacto o no, de conformidad con los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 35.

Cualquier otro reuso no contemplado en el presente artículo deberá ser autorizado previamente por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Artículo 35. PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA REUSO. El agua residual para reuso deberá cumplir con los límites máximos permisibles del siguiente cuadro:

Tipo de reuso	Demanda bioquímica de oxígeno, miligramos por litro	Coliformes fecales, número más probable por cien mililitros
Tipo I	No aplica	No aplica
Tipo II	No aplica	$< 2 \times 10^2$
Tipo III	200	No aplica
Tipo IV	No aplica	$< 1 \times 10^3$
Tipo V	200	$< 1 \times 10^3$

Artículo 36. METALES PESADOS Y CIANUROS. Los límites máximos permisibles de metales pesados y cianuros en las aguas para reuso son los presentados en el cuadro del artículo 21 del presente Reglamento.

Artículo 37. RECIRCULACIÓN INTERNA DE AGUA. Todo ente generador podrá recircular las aguas residuales antes de que las mismas se viertan al cuerpo receptor. Dicha recirculación no se considerará como reuso ni estará sujeta a las disposiciones del presente Reglamento.

CAPÍTULO VIII

PARÁMETROS PARA LODOS

Artículo 38. OBLIGATORIEDAD. Todos los lodos producidos como consecuencia del tratamiento de aguas residuales que representen un riesgo para el ambiente y la salud y seguridad humana deben cumplir los límites máximos permisibles para su disposición final del presente Reglamento.

Artículo 39. APLICACIÓN. Los lodos que se regulan en el presente Reglamento son aquéllos generados por el tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario o especial.

Artículo 40. TECNOLOGÍA Y SISTEMAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS.

Se permite el tratamiento de los lodos por medio de la tecnología o los sistemas que el ente generador considere más adecuados a sus condiciones particulares, incluyendo la incineración a temperaturas mayores de mil quinientos grados Celsius.

Artículo 41. DISPOSICIÓN FINAL. Se permite efectuar la disposición final de lodos, por cualesquiera de las siguientes formas:

- a) Aplicación al suelo: acondicionador, abono o compost;
- b) Disposición en rellenos sanitarios;
- c) Confinamiento o aislamiento; y,
- d) Combinación de las antes mencionadas.

Artículo 42. PARÁMETROS Y LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LODOS.

Para poder efectuar la disposición final de lodos de acuerdo a las formas descritas en el artículo 41 del presente Reglamento, los valores de sus propiedades fisicoquímicas no deben exceder los límites máximos permisibles descritos en el siguiente cuadro:

Disposición Final	Dimensionales	Aplicación al suelo	Disposición en rellenos sanitarios	Confinamiento o aislamiento
Arsénico	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cadmio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	50	100	> 100
Cromo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	1500	3000	> 3000
Mercurio	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	25	50	> 50
Plomo	Miligramos por kilogramo de materia seca a ciento cuatro grados Celsius	500	1000	> 1000

Los expresados en el cuadro anterior son los límites máximos permisibles para suelos con potencial de hidrógeno menor que siete unidades. En los suelos que posean potencial de hidrógeno mayor o igual que siete unidades se podrán disponer lodos hasta un cincuenta por ciento más de los valores presentados como límites máximos permisibles.

Artículo 43. APLICACIÓN AL SUELO. Los lodos que presenten metales pesados y que se ajusten a los límites máximos permisibles establecidos en el artículo 42, podrán disponerse como acondicionador del suelo, en cuyo caso se permitirá disponer hasta doscientos mil kilogramos por hectárea por año. En caso de que la aplicación sea como abono se permitirá disponer hasta cien mil kilogramos por hectárea por año.

Artículo 44. DISPOSICIÓN HACIA RELLENOS SANITARIOS. Se permitirá la disposición en un relleno sanitario de los lodos que no sean bioinfecciosos, que no requieran confinamiento y que cumplan con los límites máximos permisibles del artículo 42 del presente Reglamento.

Los rellenos sanitarios deberán contar con autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y con aval del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

Artículo 45. CONFINAMIENTO O AISLAMIENTO. Los lodos que en su estructura posean compuestos que requieran confinamiento o aislamiento para evitar el impacto adverso del manto freático, las fuentes de suministro de agua superficiales y subterráneas, el suelo, subsuelo y el aire, deben disponerse en recintos que posean autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y el aval de los Ministerios de Salud Pública y Asistencia Social y de Energía y Minas.

Artículo 46. COMERCIALIZACIÓN. La comercialización de los lodos producidos es libre, siempre que los mismos se caractericen y se cumpla con los tratados y convenios internacionales que rijan en la materia ratificados por Guatemala y con lo siguiente:

- a) No debe permitirse el contacto humano directo con los lodos.
- b) Los lodos deben cumplir las especificaciones descritas en el artículo 42.
- c) El transporte de lodos debe realizarse en recipientes y vehículos acondicionados para evitar fugas y derrames.
- d) Los recintos para su almacenamiento transitorio deben ser autorizados para el efecto por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- e) Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final deben contar con la autorización del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, y si es aplicable del Ministerio de Energía y Minas.

Artículo 47. CONTRATACIÓN DE SERVICIOS. Las empresas que presten los servicios de extracción, manejo o disposición final de lodos deberán cumplir lo dispuesto en los artículos 41, 42, 43, 44, 45 y 46 del presente Reglamento. En el caso de la contratación de cualquiera de los servicios establecidos en este artículo, el ente generador queda exento de responsabilidad.

Artículo 48. VIGILANCIA DE CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales coordinará a través de sus dependencias la realización, a su costa, de muestreos aleatorios de los lotes de lodos que sean dispuestos, a efecto de verificar el cumplimiento de los parámetros del artículo 42 del presente Reglamento, cuando sea aplicable.

CAPÍTULO IX

SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN

Artículo 49. DE LA FRECUENCIA DE TOMA DE MUESTRAS. Para el seguimiento y evaluación de aguas residuales y de aguas para reuso, los entes generadores deberán tomar a su costa, como mínimo, dos muestras al año y efectuar los análisis que correspondan de conformidad con los parámetros contenidos en el estudio técnico.

Para el seguimiento y evaluación de lodos, los entes generadores deberán tomar a su costa, como mínimo, dos muestras al año y efectuar los análisis que correspondan de conformidad con los parámetros contenidos en el estudio técnico. En el caso de las entidades contratadas para prestar los servicios de extracción, manejo y disposición final de lodos, éstas tendrán que realizar su toma de muestras de acuerdo al siguiente cuadro:

Peso promedio de lodos producidos	Periodicidad
Entre 0 y 1500 kilogramos diarios	Trimestral
Entre 1501 y 3000 kilogramos diarios	Bimensual
Más de 3000 kilogramos diarios	Mensual

Los entes generadores deberán llevar un registro de los resultados de estos análisis y conservarlos durante un plazo de cinco años posteriores a su realización, para su presentación al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales cuando le sea requerido por razones de seguimiento y evaluación.

El número de muestras simples requeridas para conformar una muestra, se indica en el cuadro siguiente:

Número de muestras simples para conformar una muestra compuesta e intervalos por muestreo		
Horas por día que opera la actividad que genera la descarga de aguas residuales	Número mínimo de muestras simples para conformar una muestra compuesta	Intervalo mínimo en horas entre toma de muestras simples
Menor que 8	2	2
De 8 a 12	3	3
Mayor que 12	4	3

Artículo 50. MEDICIÓN DE CAUDAL. En la toma de cada muestra simple se hará una medición de caudal, para poder relacionarla con la concentración y así determinar la carga.

Artículo 51. VIGILANCIA DE CUMPLIMIENTO. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales vigilará que se cumplan con todos los requisitos y procedimientos, establecidos en el presente Reglamento para los entes generadores y para las personas que descargan aguas residuales al alcantarillado público. Asimismo, coordinará a través de sus dependencias competentes, la realización de muestreos aleatorios en los cuerpos receptores y en los dispositivos para toma de muestras, para evaluar el mejoramiento de la calidad del recurso hídrico y el cumplimiento del presente Reglamento.

Artículo 52. CONSTRUCCIÓN DE DISPOSITIVOS PARA TOMA DE MUESTRAS. Los entes generadores deberán contar, en todos los puntos de descarga, con un dispositivo para facilitar la toma de muestras y la medición de caudales; dichos dispositivos deberán estar ubicados en lugares accesibles para la inspección. En el caso de los entes generadores a los cuales se aplique el artículo 22 y 23 contarán con el dispositivo para la toma de muestras del afluente.

Artículo 53. LUGARES EXCLUSIVOS PARA TOMA DE MUESTRAS. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales y otras entidades de gobierno, incluidas las descentralizadas y autónomas, de acuerdo con las competencias asignadas por la Ley, a través de sus dependencias respectivas, coordinarán las acciones para la toma de muestras, exclusivamente en lugares donde se encuentran ubicados los dispositivos de descarga mencionados en el artículo 52.

Artículo 54. MÉTODOS DE ANÁLISIS Y MUESTREO. Para los efectos de lo previsto en el presente Reglamento, los laboratorios estatales, universitarios, privados legalmente constituidos, o los laboratorios establecidos por los entes generadores, emplearán los métodos de análisis y muestreo establecidos por la Comisión Guatemalteca de Normas; o en su defecto por entidades como:

- a) Asociación Americana de Salud Pública, Asociación Americana de Obras de Agua y Federación de Ambientes Acuáticos en los Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales;
- b) Organizaciones técnicas reconocidas en el ámbito nacional e internacional, y
- c) Especificaciones del fabricante de los equipos que se utilicen.

Los informes de los resultados de los análisis de laboratorio, deberán ser firmados por profesional colegiado activo especializado en la materia.

CAPÍTULO X

PROHIBICIONES Y SANCIONES

Artículo 55. PROHIBICIÓN DE DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES. Se prohíbe terminantemente la disposición de aguas residuales de tipo ordinario a flor de tierra, en canales abiertos y en alcantarillado pluvial.

Artículo 56. PROHIBICIÓN DE DESCARGA DIRECTA. Se prohíbe descargar directamente aguas residuales no tratadas al manto freático.

Artículo 57. PROHIBICIÓN DE DILUIR. Se prohíbe el uso de cualquier tipo de aguas ajenas al ente generador, con el propósito de diluir las aguas residuales. Ninguna meta contemplada en el presente Reglamento se puede alcanzar diluyendo.

Artículo 58. PROHIBICIÓN DE REUSOS. Se prohíbe el reuso de aguas residuales en los siguientes casos:

- a) En las zonas núcleo de las áreas protegidas siguientes: parque nacional, reserva biológica, biotopo protegido, monumento natural, área recreativa natural, manantial y refugio de vida silvestre;
- b) En las zonas núcleo de los sitios Ramsar, declarados en el marco de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas;
- c) En otras áreas donde se ponga en riesgo la biodiversidad y la salud y seguridad humana;
- d) Para el uso con fines recreacionales exceptuando el tipo V, indicado en el artículo 34.

Artículo 59. PROHIBICIÓN DE DISPOSICIÓN DE LODOS. Se prohíbe terminantemente efectuar la disposición final de lodos en alcantarillados o cuerpos de agua superficiales o subterráneos.

Además, se prohíbe la disposición de lodos como abono para cultivos comestibles que se pueden consumir crudos o precocidos, hortalizas y frutas, sin haber efectuado su estabilización y desinfección respectiva ni haber determinado la ausencia de metales pesados y que no excedan las dos mil unidades formadoras de colonia por kilogramo de coliformes fecales.

Artículo 60. APLICACIÓN DE SANCIONES. Las infracciones a este Reglamento darán lugar a la aplicación de cualesquiera de las sanciones establecidas en la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, según el grado de incumplimiento de límites máximos permisibles observando:

- a) La mayor o menor gravedad del impacto ambiental, según el tipo de incumplimiento de que se trate,
- b) La trascendencia del perjuicio a la población,
- c) Las condiciones en que se produce, y
- d) La reincidencia del infractor.

La omisión del cumplimiento de alguno de los requerimientos establecidos en el artículo 6 del presente reglamento, dará lugar a que el Ministerio de Ambiente y de Recursos Naturales, de conformidad con lo estipulado en el artículo 29, 31 y 34 de la Ley de la Protección y Mejoramiento de Medio Ambiente, inicie el proceso administrativo correspondiente.

CAPÍTULO XI

DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 61. EXCEPCIÓN DE LA PREPARACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO. Se exceptúan de la preparación del estudio técnico contemplado en el artículo 5 como ente generador toda vivienda unifamiliar y aquellas edificaciones, públicas y privadas, que generen solamente aguas residuales de tipo ordinario y que cuenten con acometida autorizada hacia el alcantarillado público o de entes administradores de servicios de tratamiento de aguas residuales.

Esta excepción no aplica para las municipalidades ni las empresas que tienen concesionados los servicios de recolección, transporte, manejo o disposición de aguas residuales; ni las plantas de tratamiento de urbanizaciones que no estén conectadas a una acometida municipal; porque de conformidad con lo estipulado en el artículo 5 del presente Reglamento, son generadores de aguas residuales.

Artículo 62. LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE FÓSFORO. Quienes efectúen descargas hacia cuencas de lagos, lagunas o embalses naturales, tendrán obligación de cumplir con cinco miligramos por litro de fósforo total al finalizar la cuarta etapa. Asimismo, en el caso de los entes generadores nuevos deberán cumplir con cinco miligramos por litro de fósforo total al inicio de sus operaciones.

Artículo 63. INCUMPLIMIENTO DE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES Y SUS ETAPAS CORRESPONDIENTES. Se entenderá que hay contaminación, para todos los efectos legales, cuando los entes generadores existentes y las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público, incumplan con los límites máximos permisibles establecidos en las etapas correspondientes del artículo 17 y, también, cuando incumplan con las consideraciones de los artículos 19, 20, 22, 26, 27 y 28.

Se entenderá que existe contaminación, para todos los efectos legales, cuando los entes generadores nuevos y las personas nuevas que descargan aguas residuales al alcantarillado público, incumplan con los límites máximos permisibles en las etapas de cumplimiento correspondientes y las consideraciones contempladas en los artículos 17, 19, 20, 22, 26, 27 y 28, siempre y cuando los valores de sus descargas excedan los límites máximos permisibles que en el momento tengan autorizados los entes generadores existentes.

El incumplimiento de los límites máximos permisibles por parte de los entes generadores nuevos y las personas nuevas que descargan aguas residuales al alcantarillado público, de conformidad con los artículos 21 y 22, y 30, respectivamente, con valores que no excedan los límites máximos permisibles autorizados para los entes generadores existentes, conforme a los artículos 17, 19, 20 y 22 y las personas existentes que descargan aguas residuales al alcantarillado público, conforme a los artículos 26, 27 y 28, en las etapas de cumplimiento uno, dos y tres, dará lugar a la aplicación de las sanciones administrativas que contempla la ley.

Para todos los efectos legales, el período de estabilización otorgado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales a un ente generador nuevo o a una persona nueva que descarga aguas residuales al alcantarillado público, se considerará como una situación de caso fortuito o desastres naturales, y en consecuencia cualquier incumplimiento dentro de dicho período estará excluido de responsabilidad penal o administrativa.

Artículo 64. REVISIÓN DEL REGLAMENTO DE DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES. La revisión del presente Reglamento deberá hacerse cada cuatro años, respetando el principio de gradualidad en las etapas de cumplimiento y considerando el grado de cumplimiento de los entes generadores y de las personas que descargan al alcantarillado público.

Artículo 65. CUMPLIMIENTO DE LAS MUNICIPALIDADES. Las Municipalidades que opten por cumplir lo preceptuado en el literal b) del artículo 24 de este Reglamento, iniciarán el cumplimiento de los límites máximos permisibles de la etapa uno para entes generadores existentes, el dos de mayo de dos mil once. A partir de dicha fecha, aplicarán las reducciones en los plazos y etapas establecidos, hasta el final de los dieciocho años.

Esta disposición no exime a las Municipalidades del cumplimiento de los demás aspectos que contempla el presente Reglamento.

Artículo 66. CUMPLIMIENTO DE PERSONAS PRIVADAS QUE DESCARGAN A SISTEMAS DE TRATAMIENTO PRIVADOS. Las personas individuales o jurídicas privadas que descargan aguas residuales de tipo especial a un sistema de alcantarillado privado para conducir dichas aguas a la planta de tratamiento de aguas residuales privada en operación no se consideran entes generadores de aguas residuales o personas que descargan aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público, porque para los efectos de aplicación del presente Reglamento, la persona individual o jurídica responsable de administrar la planta de tratamiento será considerada el ente generador o la persona que descarga aguas residuales de tipo especial al alcantarillado público para todos los efectos del presente Reglamento. El único punto de referencia para el control de la descarga en estos casos es el efluente de la planta de tratamiento.

Artículo 67. CASOS NO PREVISTOS. Todos aquellos casos que no hayan sido previstos en el presente Reglamento, deberán ser resueltos por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales de conformidad con los principios de la Ley del Organismo Judicial.

Artículo 68. EPÍGRAFES. Los epígrafes que preceden a los artículos del presente Reglamento, no tienen validez interpretativa y no pueden ser citados con respecto al contenido y alcances de esta norma.

CAPÍTULO XII

DISPOSICIONES TRANSITORIAS

Artículo 69. PLAZO PARA LA REALIZACIÓN DEL ESTUDIO TÉCNICO. La persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que vierten éstas o no a un cuerpo receptor o al alcantarillado público deberá realizar el estudio técnico estipulado en el presente Reglamento, en el plazo de un año, contado a partir de la vigencia del mismo.

Artículo 70. EXPEDIENTES EN TRÁMITE. Las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que vierten las aguas residuales a cuerpos receptores cuya solicitud de aprobación de instrumentos de evaluación ambiental se encuentre en trámite antes de la vigencia del presente Reglamento, se considerarán entes generadores existentes para todos los efectos de su aplicación, de acuerdo a los artículos 17, 18, 19, 20 y 22.

Asimismo a las personas individuales o jurídicas, públicas o privadas que viertan sus descargas al alcantarillado público y cuya solicitud de aprobación de instrumentos de evaluación ambiental se encuentre en trámite antes de la vigencia del presente Reglamento, les será aplicable lo preceptuado en los artículos 26, 27, 28 y 29 del mismo.

Artículo 71. LÍMITES APROBADOS EN ESTUDIOS DE EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL. Cuando en la resolución del Estudio de Evaluación Impacto Ambiental, se hayan aprobado límites con valores menores que los contenidos en el presente Reglamento, dichos límites continuarán siendo aplicables a ese ente generador existente. En caso de que los valores de los límites aprobados en la resolución del Estudio de Evaluación Impacto Ambiental sean mayores a los establecidos en los artículos 17, 19, 20, 22, 26, 27 y 28, ese ente generador o persona que descarga aguas residuales al alcantarillado público, deberá cumplir con lo dispuesto en las etapas y las fechas máximas de cumplimiento que corresponda a los artículos mencionados.

Artículo 72. MODELO DE REDUCCIÓN PROGRESIVA DE CARGAS DE DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO. Los resultados que se obtengan en los Estudios Técnicos, servirán de base para elaborar, en un plazo no mayor de dieciocho meses a partir de la vigencia del presente Reglamento, el modelo de reducción progresiva de cargas correspondiente a la demanda química de oxígeno.

Artículo 73. OTROS PARÁMETROS. Otros parámetros que en el futuro se identifiquen como competencia de este Reglamento serán agregados al presente cuerpo normativo al determinarse los mismos.

Artículo 74. MANUALES. El Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, queda facultado para que, en el plazo de un año a partir de la vigencia del presente Reglamento, elabore el manual general que contenga, entre otros temas, los siguientes:

- a) Toma de muestras de aguas residuales, aguas para reuso y lodos.
- b) Cálculo de cargas.
- c) Aplicación del modelo de reducción progresiva de cargas.
- d) Deducción especial de valores en parámetros.

Artículo 75. DEROGATORIA. Se deroga el Acuerdo Gubernativo número 66-2005, de la Presidencia de la República, de fecha diecisiete de febrero de dos mil cinco, que contiene el Reglamento de Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores y cualquier otra disposición que se oponga al presente Reglamento.

Artículo 76. VIGENCIA. El presente Acuerdo Gubernativo empezará a regir al día siguiente después de su publicación en el Diario de Centro América.

COMUNÍQUESE.

OSCAR BERGER PERDOMO

JUAN MARIO DARY FUENTES

JORGE RAÚL ARROYAVE REYES