



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

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS
RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA
METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE
TRATAMIENTO BÁSICO**

Raúl Alejandro Urizar Ramírez

Asesorado por el Ing. Guillervin Adolfo Macario Castro

Guatemala, marzo de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS
RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA
METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE
TRATAMIENTO BÁSICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RAÚL ALEJANDRO URÍZAR RAMÍREZ

ASESORADO POR EL ING. GUILLERVIN ADOLFO MACARIO CASTRO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, MARZO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paíz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Raúl de León de Paz
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Francisco Espinoza Smith
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS
RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA
METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE
TRATAMIENTO BÁSICO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 8 de agosto de 2016.

Raúl Alejandro Urizar Ramírez

Guatemala 10 octubre 2016

Ingeniero Carlos Salvador Wong Davi
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimados Ingenieros:

Deseándoles éxitos y grandes bendiciones de Dios, les escribo de la manera más atenta para informarles que he revisado y aprobado el trabajo de graduación del estudiante de la carrera de Ingeniería Química, Raúl Alejandro Urizar Ramírez con carné 200380036, titulada **"DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGIA DE TRATAMIENTO BASICO"**. Por lo que considero que el documento de informe final de trabajo de graduación revisado, llena los requisitos técnicos.

Sin ningún otro particular, me suscribo de ustedes.

Atentamente,


Guillermo Adolfo Macario Castro
Ingeniero Químico
Colegiado No. 1465
Ing. Guillermo Adolfo Macario Castro
Colegiado 1,465



Guatemala, 17 de octubre de 2016.
Ref. EIQ.TG-IF.060.2016.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **023-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Raúl Alejandro Urizar Ramírez**.
Identificado con número de carné: **2003-80036**.
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRATAMIENTO BÁSICO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Guillervin Adolfo Macario Castro**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.008.2017

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 Trabajo de Graduación del estudiante, **RAÚL ALEJANDRO URÍZAR RAMÍREZ** titulado: **“DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRATAMIENTO BÁSICO”**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

“Id y Enseñad a Todos”

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2017

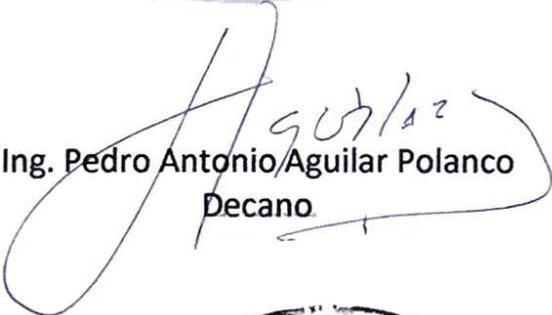
Cc: Archivo
CSWD/ale



DTG. 118.2017

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: **DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SIETE PARÁMETROS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA DEL SECTOR DE ALIMENTOS EN EL ÁREA METROPOLITANA, PARA LA GENERACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE TRATAMIENTO BÁSICO**, presentado por el estudiante universitario: **Raúl Alejandro Urizar Ramírez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, marzo de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por todas sus bendiciones y por brindarme sabiduría e iluminar mi camino hacia el éxito.
Universidad de San Carlos de Guatemala	La tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala, y en especial a la Facultad de Ingeniería, por haberme enseñado las herramientas para triunfar en la vida.
Mi familia	Por darme siempre sus sabios consejos.
Mis catedráticos	Por sus enseñanzas y consejos.
Mi asesor	Por su confianza e impulso para culminar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una importante parte de mi vida y abrirme las puertas para llegar a cumplir este sueño.

Facultad de Ingeniería

Porque a través de sus catedráticos adquirí conocimientos que me han sido de mucha utilidad.

Mis catedráticos

Que con mucho gusto y sin egoísmo me brindaron sus conocimientos.

Mis amigos

Por su apoyo durante los diferentes ciclos de mi vida como estudiante ya que ellos también tienen méritos en esta meta alcanzada.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS	XVII
Hipótesis.....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Agua.....	5
2.1.1. Propiedades físicas y químicas del agua	6
2.1.1.1. Densidad.....	6
2.1.1.2. Tensión superficial	7
2.1.1.3. Constante dieléctrica.....	7
2.1.1.4. Disolvente	7
2.1.1.5. Agua residual	8
2.1.2. Tipo de aguas residuales	8
2.1.2.1. Aguas residuales de tipo especial	8
2.1.2.2. Aguas residuales de tipo ordinario	9
2.1.3. Caracterización de las aguas residuales.....	9
2.1.3.1. Temperatura.....	10
2.1.3.2. Color	10
2.1.3.3. Conductividad	11

2.1.3.4.	Turbiedad	11
2.1.3.5.	Sólidos.....	11
2.1.3.6.	Sólidos disueltos.....	12
2.1.3.7.	Sólidos suspendidos totales (SST)	13
2.1.3.8.	Potencial de hidrógeno	13
2.1.3.9.	Aceites y grasas	14
2.1.3.10.	Materia flotante.....	15
2.1.3.11.	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	15
2.1.3.12.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	16
2.1.3.13.	Arsénico.....	17
2.1.3.14.	Cadmio	18
2.1.3.15.	Coliformes fecales	18
2.2.	Sistemas de tratamiento de aguas residuales	18
2.2.1.	Tratamiento físico	18
2.2.1.1.	Separación de sólidos gruesos	19
2.2.1.2.	Separación de sólidos molestos	19
2.2.1.3.	Separación de sólidos no putrescibles	19
2.2.1.4.	Separación de sólidos finos	20
2.2.1.5.	Cámara desgrasadora o coalescedores	20
2.2.1.6.	Estanque de ecualización y homogenización.....	20
2.2.2.	Tratamiento químico.....	21
2.2.2.1.	Ajuste de PH.....	21
2.2.2.2.	Coagulación.....	21

	2.2.2.3.	Floculación y preparación de polímero	21
	2.2.2.4.	Flotación	22
	2.2.2.5.	Tratamiento biológico	22
	2.2.2.6.	Sedimentación	22
	2.2.2.7.	Irrigación en tierra	23
2.3.		Reglamento de descargas de aguas residuales de Guatemala (Acuerdo Gubernativo 236-2006)	23
2.3.1.		Parámetros de calidad de agua de los efluentes.....	24
2.4.		Clasificación industrial internacional uniforme (CIU):	25
2.4.1.		Actividades principales, secundarias y auxiliares	25
2.4.2.		Sección D: industrias manufactureras	26
2.4.2.1.		División 15: elaboración de productos alimenticios y bebidas.....	26
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1.		Variables	27
3.1.1.		Análisis de aguas residuales.....	27
3.1.1.1.		Variables independientes	27
3.1.1.2.		Variables dependientes	27
3.1.2.		Desarrollo del proceso general de tratamiento de aguas residuales.....	28
3.1.2.1.		Procedimientos empleados	28
3.2.		Delimitación del campo de estudio	28
3.3.		Recursos humanos disponibles	29
3.4.		Recursos materiales disponibles	29
3.4.1.		Proceso de cumplimiento de objetivos	30
3.4.1.1.		Procesamiento de la información	30
3.4.1.2.		Compilación de información	30

3.5.	Técnica cualitativa y cuantitativa	30
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	31
3.6.1.	Análisis y discusión de datos	31
3.6.2.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	31
3.7.	Análisis estadístico.....	32
3.7.1.	Datos recolectados.....	32
3.7.2.	Análisis calculado para temperatura	33
3.7.3.	Análisis realizado en correlación DQO, DBO, SS, A&G.....	45
4.	RESULTADOS	47
4.1.	Determinación de la agrupación de los parámetros representativos del sector de alimentos	47
4.1.1.	Análisis de 39 datos de nitrógeno total	48
4.1.2.	Análisis de 39 datos de fósforo total	50
4.1.3.	Análisis de 39 datos de demanda química de oxígeno	52
4.1.4.	Análisis de 39 datos de demanda bioquímica de oxígeno	53
4.1.5.	Análisis de 39 datos de solidos suspendidos.....	55
4.1.6.	Análisis de 39 datos de aceites y grasas	57
4.2.	Relación de los parámetros SS, A&G y DBO con DQO.....	59
4.2.1.	Comprobación de hipótesis	60
4.3.	Correlación del nitrógeno y fósforo total	61
4.3.1.	Modelo de correlación nitrógeno y fósforo total	61
4.3.2.	Comprobación de hipótesis	61
4.4.	Metodología de tratamiento básico.....	63

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	65
CONCLUSIONES.....	71
RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	75
APÉNDICES.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Análisis gráfico del papel probabilístico para datos reales de temperatura.....	42
2.	Gráfica de papel probabilístico de temperatura	47
3.	Gráfica de distribución normal de temperatura	48
4.	Gráfica de papel probabilístico de nitrógeno total.....	49
5.	Gráfica de distribución normal de nitrógeno total	50
6.	Gráfica de papel probabilístico de fósforo total.....	51
7.	Gráfica de distribución normal de fósforo total	51
8.	Gráfica de papel probabilístico de demanda química de oxígeno.....	52
9.	Gráfica de distribución normal de demanda química de oxígeno	53
10.	Gráfica de papel probabilístico de demanda bioquímica de oxígeno	54
11.	Gráfica de distribución normal de demanda bioquímica de oxígeno.....	55
12.	Gráfica de papel probabilístico de sólidos suspendidos	56
13.	Gráfica de distribución normal de sólidos suspendidos	57
14.	Gráfica de papel probabilístico de aceites y grasas.....	58
15.	Gráfica de distribución normal de aceites y grasas	59
16.	Propuesta del sistema de tratamiento	60
17.	Gráfica de correlación de fósforo y nitrógeno total	61
18.	Propuesta del unidad de tratamiento.....	62
19.	Esquema UTC (<i>University of Cape Town</i>).....	63

TABLAS

I.	Datos reales de parámetros analizados del sector de alimentos, basados en reportes realizados al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)	32
II.	Evaluación de la tendencia de la temperatura para las diferentes industrias del sector de alimentos	34
III.	Parámetros de agrupación y validación por prueba de desfases de Cramer	35
IV.	Parámetros de agrupación y validación por “t” de Student.....	36
V.	Parámetros de agrupación y validación	37
VI.	Papel probabilístico tendencia normal de temperatura	38
VII.	Papel probabilístico tendencia Galton de temperatura	39
VIII.	Papel probabilístico tendencia real de temperatura	41
IX.	Datos para la generación de modelo determinístico del nitrógeno y fósforo total.....	43
X.	Datos de análisis de errores, por medio de correlograma para la relación de fósforo y nitrógeno totales	44
XI.	Datos obtenidos para la generación del modelo múltiple basado en los datos reales	45
XII.	Datos obtenidos al aplicar los coeficientes del modelo múltiple utilizando datos reales y su relación de error	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CF	Coliformes fecales
DBO_{5,20}	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
PT	Fósforo total
°C	Grado celsius
g	Gramo
G Y A	Grasas y aceites
kg	Kilogramo
L	Litro
MF	Materia flotante
Me	Mediana
mg	Miligramo
mL	Mililitro
NT	Nitrógeno total
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
SST	Sólidos suspendidos totales
T	Temperatura

GLOSARIO

Afluente	Agua captada por un ente generador.
A.G. 236-2006	Acuerdo Gubernativo 236-2006.
Agua residual	Aguas cuya composición y calidad original han sido afectadas como resultado de su utilización.
Aguas residuales de tipo especial	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.
Alcantarillado público	Conjunto de tuberías y otros accesorios utilizados por la Municipalidad, para recolectar y conducir las aguas residuales de tipo ordinario o de tipo especial.
Anaerobio	Proceso que tiene lugar en ausencia de oxígeno.
Área metropolitana	Región urbana que incluye la ciudad de Guatemala y ciudades satélites que funcionan como ciudades dormitorio, como Villa Nueva, San Miguel Petapa, Mixco, San Juan Sacatepéquez, Amatitlán y Chinautla.

Biodegradable	Producto o sustancia que puede descomponerse en sus elementos químicos que los conforman, debido a la acción de agentes biológicos en condiciones ambientales naturales.
Caracterización de un efluente o un afluente	Determinación de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas, según los parámetros requeridos por el A.G. 236-2006.
Carga	Es el resultado de multiplicar el caudal por la concentración, determinados en un efluente y expresada en kilogramos por día.
CIU	Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas.
Clasificación industrial internacional uniforme	Conjunto de categorías de actividades para que las entidades puedan clasificarse según la actividad económica que realizan.
Coloidal	Sistema fisicoquímico formado por dos o más fases, principalmente: una continua, normalmente fluida, y otra dispersa en forma de partículas; por lo general sólidas.
Ente generador	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.

Estudio técnico	Estudio realizado para caracterizar efluentes, descargas, aguas para reúso y lodos.
Etapas de cumplimiento	Plazo de cumplimiento de los límites permisibles de descarga de aguas residuales.
Hídrico	cuerpos receptores, con el fin de vigilar el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
Límite máximo permisible	Valor asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en las etapas correspondientes para aguas residuales y en aguas para reúso y lodos.
LNS	Laboratorio Nacional de Salud.
Lodos	Sólidos con un contenido variable de humedad, provenientes del tratamiento de aguas residuales.
MARN	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
Ministerio de Ambiente y Recursos Hídrico	Entidad con la autorización respectiva para realizar muestreos aleatorios en los vertidos y en los cuerpos receptores, con el fin de vigilar el cumplimiento del Acuerdo Gubernativo 236-2006.
Monitoreo	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.

MSPAS

Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

Parámetro

Variable que identifica una característica de las aguas residuales, aguas para reúso o lodos, asignándole un valor numérico.

Punto de descarga

Sitio en el cual el efluente de aguas residuales confluye en un cuerpo receptor o con otro efluente de aguas residuales.

Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y la disposición de lodos

Bajo el Acuerdo Gubernativo 236-2006 es la normativa para la regulación de la calidad de los vertidos de aguas residuales a cuerpos de agua, alcantarillado público y el reuso, para las aguas ordinarias y especiales, así como para la disposición de lodos.

Sistema de tratamiento de agua residual

Cualquier proceso físico, químico o biológico o una combinación de los mismos, en el cual las aguas residuales son tratadas para mejorar sus características.

STAR

Sistema de Tratamiento de Agua Residual.

URHC

Unidad de Recursos Hídricos y Cuencas.

RESUMEN

El presente trabajo agrupó y analizó una serie de datos basados en 39 industrias de alimentos tomadas al azar en el área metropolitana, de las cuales fue posible determinar valores de descarga de aguas residuales (AR) al alcantarillado público considerando únicamente la demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas (A&G), sólidos suspendidos (S.S.), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura (T °C), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT).

Los datos fueron colectados de la base de datos del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la realización de una visita e inspección para conocer el tratamientos de AR existente, debido a que el MARN contaba con la suficiente información por medio de expedientes ambientales y la base de datos de entes generadores de aguas residuales no se requirió la toma de mayores muestras para su análisis en el Laboratorio Nacional de Salud –LNS-, del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social –MSPAS-.

El objetivo fue desarrollar un análisis estadístico para comprobar las hipótesis de existencia de una relación química del nitrógeno total (NT) y el fósforo total (PT), así como del DQO con el DBO, S.S. y A&G en las industrias de alimento consideradas; y validar la tendencia de la T °C. Lo anterior permitió la agrupación y manejo de los datos para su interpretación por medio de afinidad química, estableciendo la obtención de los resultados para la proposición del tratamiento de aguas residuales de este sector. De manera general la propuesta determinó que la temperatura de dichas aguas puede ser manejada por un único pretratamiento, tanques de estabilización. Al presentar

un agrupamiento y tendencias muy similares, el enfoque en la disminución principalmente de S.S., A&G y DBO, propició crear una propuesta de disminución de la DQO con un tratamiento primario, biodigestores; y los nutrientes como el NT y FT, por un tratamiento secundario, tanques de biofiltros. Cabe resaltar que el análisis y propuesta no fue realizado considerando caudales y, por ende, cargas, por lo que el seguimiento en esta investigación se hace de importancia.

OBJETIVOS

General

Determinación del comportamiento de siete parámetros de las aguas residuales en la industria del sector de alimentos en el área metropolitana para la generación de una metodología tratamiento básico.

Específicos

1. Analizar la correcta agrupación de los distintos parámetros representativos seleccionados, para fortalecer la metodología del proceso general de tratamiento de aguas residuales.
2. Verificar la relación de los parámetros de demanda química de oxígeno con aceites y grasas, sólidos suspendidos y la demanda bioquímica de oxígeno para la propuesta de un tratamiento primario y/o secundario.
3. Verificar la relación entre el nitrógeno y fósforo total para la propuesta de una unidad de tratamiento.
4. Plantear la metodología de un proceso general de tratamiento de aguas residuales para el sector de alimentos en el área metropolitana de Guatemala.

Hipótesis

- Relación entre el nitrógeno total y el fósforo total

Ho = no existe correlación directa entre el nitrógeno y el fosforo total, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos; no es posible implementar un tratamiento terciario para estos.

Ha = existe una correlación directa entre el nitrógeno y el fosforo total, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos; es posible implementar un tratamiento terciario para estos.

- Relación DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas

Ho = no existe correlación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos; no es posible implementar un tratamiento primario y/o secundario para estos.

Ha = existe una correlación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos; es posible implementar un tratamiento primario y/o secundario para estos.

INTRODUCCIÓN

Las aguas residuales son todas aquellas que durante los procesos productivos, como de la industria alimenticia, sufren un cambio en su calidad y características alterando su pureza, convirtiéndola en subproducto de descarte conllevando a un deterioro del ambiente. Debido a que las condiciones de generación son variadas y diversas, se hace necesario determinar la manera de cómo agrupar y generalizar tendencias de reducción ya que debe existir el cumplimiento de la legislación nacional vigente, Acuerdo Gubernativo 236-2006, Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, el cual restringe concentraciones de descarga de veinte parámetros que, en ocasiones, crea una complejidad al implementar los sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) tipo paquete.

Por lo anterior, el presente documento proyecta la generalización del manejo de aguas residuales en la industria de alimentos, considerando parámetros prioritarios de aguas residuales, que logren ser representativos según diversas producciones y características, así por este medio, se podrá llevar a su reducción creando el proceso de un STAR efectivo, que considere la correlación y acción química para los valores de demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas (A&G), sólidos suspendidos (S.S.), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura (T°C), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), como los de mayor monitoreo y tratamiento para su descarte.

La complejidad radicó en la metodología considerada para dicha relación, de ahí que el análisis estadístico de una serie de monitoreos de 39 industrias alimenticias, ubicadas en el área metropolitana de Guatemala, fue de utilidad

para interpretar la afinidad química para su ejecución, se valió de un grupo de valores colectados previamente en campo y obtenidos de la base de datos de entes generadores de aguas residuales y de instrumentos ambientales, que validaron una tendencia o definición de error grupal por métodos estadísticos como la tendencia normal y de Galton, así como del sistema gráfico de error por medio de papel probabilístico. Para su análisis e interpretación adecuada se usó la comprobación de las hipótesis planteadas por medio del método de Pearson y se contempló los posibles errores de una serie de datos por tendencia central, por lo que se apoyó en distintos modelos estadísticos para tales análisis pudiendo simplificar procedimientos y apoyar las hipótesis planteadas.

1. ANTECEDENTES

El gobierno de Guatemala ha realizado esfuerzos para mitigar los problemas relacionados con la descarga de aguas residuales sin tratamiento de origen doméstico, industrial y agrícola, las cuales ocasionan un deterioro del ambiente hídrico. Debido a esto, en el 2000 el Gobierno estableció el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) con el mandato de planificar y ejecutar políticas concernientes al manejo del ambiente hídrico.

En 2006 entró en vigencia el “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”, por Acuerdo Gubernativo Número 236-2006. Esta es una normativa para la regulación de la calidad de los vertidos de aguas residuales a cuerpos de agua, alcantarillado público y el reúso, para las aguas ordinarias, las aguas especiales y la disposición de lodos. El Reglamento se complementa con el Manual General del Acuerdo Gubernativo 236-2006, del Acuerdo Ministerial 105-2008.

En Guatemala, además de las normativas para la regulación de la calidad del agua residual, a nivel industrial y doméstico, existen trabajos de investigación en relación a calidad de agua realizados por la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

En 2011, Beatriz Adriana Valle Oliva realizó su trabajo de graduación con el título *Priorización de parámetros del Acuerdo Gubernativo 236-2006 para aguas residuales del sector Cárnico (CIU 1511)*. En dicho trabajo se realizó la evaluación y obtención de los parámetros prioritarios del sector cárnico en

donde se obtuvo una serie de resultados de gran valor para la elaboración y sustento del proyecto propuesto, al determinar como prioritarios los parámetros de pH, temperatura, A&G, DBO, DQO, nitrógeno y fósforo total, y color. Se comparó los resultados de los análisis contra el A.G. 236-2006 determinando, además, el camino para la generación de aguas residuales durante los procesos.

De igual manera en 2014, Ana Beatriz Martínez Rodas realizó su trabajo de graduación: *Identificación de los parámetros de mayor representatividad en la descarga de aguas residuales del sector industrial de lácteos Según el A.G. 236-2006 y propuesta de unidades de tratamiento para su reducción*, en donde se busca por primera vez una alternativa general para el tratamiento de aguas residuales que puedan disminuir los parámetros prioritarios de un sector industrial en específico, industria de lácteos. Se realizaron actividades de campo y bibliográficas para la propuesta del sistema de tratamiento físico-químico de aguas residuales industriales, para un grupo de quince empresas distribuidas en el departamento de Guatemala.

Los resultados de la priorización de los parámetros determinó que el objeto de reducción en la temperatura, pH, DBO_{5,20}, DQO, nitrógeno y fósforo total y color deben ser tratados para el mayor cumplimiento del “Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos”.

En 2011, Luis Fernando González Serrano elaboró su trabajo de graduación con el título *Evaluación a nivel laboratorio de la eficiencia de dos coagulantes para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la producción de aceites y grasas comestibles*; esta investigación procedió a evaluar la eficiencia de dos coagulantes (sulfato de aluminio y cloruro férrico) para disminuir la carga de DQO y DBO, en las mismas condiciones de pH del

agua, concentración de coagulante, tiempo de contacto y velocidad de agitación.

Dicha investigación posee como objeto caracterizar los parámetros fisicoquímicos del efluente original y los efluentes tratados con cada uno de los dos coagulantes comerciales seleccionados, según el A.G. 236-2006, comparando los resultados obtenidos de la caracterización con los límites máximos permisibles establecidos con dicho reglamento.

En 2009, la Consultoría para la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo realizó un proyecto con el título *Elaboración de estándares de desempeño en calidad del agua en sectores prioritarios a nivel de Centro América* con el fin de cumplir el acuerdo del Consejo de Ministros de Ambiente aprobado en julio de 2005 en el marco del Acuerdo de Cooperación CCAD/USAID/DR-CAFTA.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agua

El agua es un líquido incoloro, inodoro, sin sabor que cubre las tres cuartas partes del planeta Tierra. La importancia del agua reside en que casi la totalidad de los procesos químicos que suceden en la naturaleza, no solo en los organismos vivos sino también en la superficie no organizada de la tierra, así como los que se llevan a cabo en laboratorios y en la industria, tienen lugar entre sustancias disueltas en agua.

La molécula del agua cuya fórmula es H_2O , contiene dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Entre las moléculas de agua se establecen enlaces por puentes de hidrógeno debido a la formación de dipolos electrostáticos que se originan al situarse un átomo de hidrógeno entre dos átomos más electronegativos, en este caso de oxígeno. El oxígeno, al ser más electronegativo que el hidrógeno, atrae más hacia este los electrones compartidos en los enlaces covalente con el hidrógeno, cargándose negativamente, mientras los átomos de hidrógeno se cargan positivamente, estableciéndose así dipolos eléctricos. Los enlaces por puentes de hidrógeno son enlaces por fuerzas de van der Waals de gran magnitud, aunque son unas veinte veces más débiles que los enlaces covalentes.

Los enlaces por puentes de hidrógeno entre las moléculas del agua pura son responsables de la dilatación del agua al solidificarse, es decir, su disminución de densidad cuando se congela. En estado sólido, las moléculas de agua se ordenan formando tetraedros, situándose en el centro de cada

tetraedro un átomo de oxígeno y en los vértices dos átomos de hidrógeno de la misma molécula y otros dos átomos de hidrógeno de otras moléculas que se enlazan electrostáticamente por puentes de hidrógeno con el átomo de oxígeno. La estructura cristalina resultante es muy abierta y poco compacta, menos densa que en estado líquido

2.1.1. Propiedades físicas y químicas del agua

Se atribuyen principalmente a los enlaces por puente de hidrógeno, los cuales se presentan en mayor número en el agua sólida; en la red cristalina cada átomo de la molécula de agua está rodeado tetraédricamente por cuatro átomos de hidrógeno de otras tantas moléculas de agua.

2.1.1.1. Densidad

La densidad del agua está en función de la expansión y contracción de su volumen extendiendo primeramente esto, al elevar la temperatura de un volumen de agua se estará expandiendo su volumen y, a la vez, disminuyendo su densidad, y viceversa, si se enfría un volumen de agua se contraerá su volumen y aumentará su densidad sin variar en ambos casos las masas.

El agua, al descender en su temperatura hasta antes de que el volumen llegue a 4°C, se contrae, pero al seguir descendiendo de 4°C en vez de seguir marcando una contracción del volumen, esta contradictoriamente empieza a marcar una expansión del volumen por lo cual su densidad empieza a disminuir nuevamente. El agua obtiene su máxima densidad a 4 °C y es igual a 1gm/cm³.

2.1.1.2. Tensión superficial

La tensión superficial es el trabajo necesario para expansionar la superficie de un líquido por unidad de área. En el agua las fuerzas intermoleculares, debido a los puentes de hidrógeno, son relativamente de gran magnitud, por lo que el agua tiene una mayor tensión superficial que la de los líquidos orgánicos. La superficie del líquido se comporta como una película capaz de alargarse y al mismo tiempo de ofrecer cierta resistencia al intentar romperla.

Esta alta tensión superficial del agua hace que esta se eleve en un tubo capilar y se esté en presencia del fenómeno capilaridad.

2.1.1.3. Constante dieléctrica

La constante dieléctrica mide la propiedad no conductora o aislante de una sustancia respecto de la electricidad. El agua químicamente pura es mala conductora, pero al tener electrolitos empieza a marcar conductividad y su constante dieléctrica empieza a disminuir. La capacidad conductora del agua es útil para determinar la cantidad de sólidos disueltos.

2.1.1.4. Disolvente

El agua es considerada como un disolvente universal en el que prácticamente todas las sustancias son solubles hasta cierto grado. El agua contiene a la mayoría de sales minerales en solución verdadera, también contiene partículas insolubles en suspensión en la que cada partícula está rodeada de agua teniendo cada una la superficie que constituye una barrera entre sólido y líquido; tiene también coloides o partículas en suspensión.

2.1.1.5. Agua residual

Las aguas residuales pueden definirse como una combinación de los desechos líquidos procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia.

El agua residual está constituida esencialmente, por el agua de abastecimiento, luego de haber sido contaminada por los diversos usos a que ha sido sometida. Es indispensable conocer la fuente de las aguas residuales y, consecuentemente, los componentes que la forman.

La determinación de las descargas de aguas residuales es fundamental para el diseño de redes de alcantarillado sanitario, tratamiento de las aguas residuales y en su disposición final.

2.1.2. Tipo de aguas residuales

Las aguas residuales pueden ser de diferentes tipos de acuerdo con su procedencia, así se tiene:

2.1.2.1. Aguas residuales de tipo especial

Las aguas de tipo especial son las 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.

Las aguas residuales especiales varían en su composición de acuerdo con los procesos industriales a los que son sometidos. Algunas son aguas de enjuague relativamente limpias, otras se encuentran fuertemente cargadas de materia orgánica o mineral, o con sustancias corrosivas, venenosas, inflamables o explosivas.

2.1.2.2. Aguas residuales de tipo ordinario

Las aguas residuales de tipo ordinario son las 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.

Las aguas residuales ordinarias provienen de las residencias, instalaciones comerciales, institucionales y similares. Predomina en ellas los contaminantes de tipo orgánico. Está compuesta por las materias minerales orgánicas originalmente contenidas en el agua suministrada a la comunidad, se agrega un conjunto de materias fecales, papel, jabón, suciedad, restos de alimentos (basura) y otras sustancias.

2.1.3. Caracterización de las aguas residuales

Las aguas residuales poseen características generales en las que se agrupan las sustancias de iguales efectos sobre la calidad de las mismas. Pueden ser características físicas, químicas y biológicas.

Es importante conocer todas las características del agua residual, con ello se logra deducir de manera más rápida y práctica el tipo de tratamiento al cual se puede someter. “Toda caracterización del agua residual se puede determinar

mediante un programa de muestreo apropiado que asegure la representatividad de la muestra, confiabilidad en el análisis de cada parámetro todo ello bajo un estricto procedimiento amparado en las normas estándar de cada localidad.”¹

2.1.3.1. Temperatura

“La temperatura del agua es un parámetro de importancia en las aguas residuales, y en la mayoría de caracterizaciones se determina este parámetro.”² Es determinante, debido a sus efectos sobre las reacciones químicas y la proporción de la reacción, la vida acuática y la adecuación del agua para usos beneficiosos.

La temperatura en el agua afecta la energía cinética de los reactivos, así como la estabilidad y actividad de las enzimas que participan en reacciones bioquímicas. En consecuencia, la temperatura ejerce una marcada influencia sobre la reproducción, crecimiento y el estado fisiológico de todas las entidades vivas. Asimismo, la temperatura en el agua desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de ecosistemas en el agua al regular o afectar otros factores abióticos del ecosistema como son: la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, el estado físico de nutrientes y propiedades fisicoquímicas del medio acuoso como: pH, potencial redox, solubilidad de gases, densidad, el estado físico y la viscosidad del agua.

2.1.3.2. Color

El color en aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se

¹ SOLSONA, Felipe. *Guías para elaborar normas de calidad del agua de bebida en los países en desarrollo*. p. 47.

² *Ibíd.*

denomina color aparente, mientras que el causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. El color verdadero se obtiene de una muestra filtrada.

El color de las aguas residuales se debe a la infiltración en sistemas de recolección, descargas industriales y la descomposición de compuestos orgánicos. El color de las aguas residuales puede ser de gran variedad, según el uso, el tiempo después de la descarga y la descomposición bacteriana (aerobia o anaerobia).

2.1.3.3. Conductividad

La conductividad se relaciona directamente con las sales inorgánicas disueltas en el agua. La conductividad es la propiedad del agua para transmitir o conducir calor, electricidad o sonido.

2.1.3.4. Turbiedad

La turbiedad es una medida óptica de transmisión de la luz en el agua del material sólido o coloidal suspendido en el agua. “La turbiedad se mide en Unidades nefelométricas de turbidez, o *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU). Es un parámetro que puede ser usado para proporcionar una estimación de la concentración de TSS (sólidos totales en suspensión).”³

2.1.3.5. Sólidos

En las aguas residuales se encuentra todo tipo de sólidos, distinguiéndose entre ellos orgánicos e inorgánicos. Los sólidos orgánicos son sustancias que

³ Ibíd.

contienen carbón, hidrógeno y oxígeno, pudiendo alguno de estos elementos combinarse con nitrógeno, azufre o fósforo. Los principales grupos lo conforman las proteínas, los carbohidratos y las grasas, susceptibles todos de ser degradados por medio de bacterias y de organismos vivos que son combustibles, es decir, pueden ser quemados. Los sólidos inorgánicos son sustancias inertes y no son susceptibles de ser degradados, designándoseles comúnmente como minerales. Dentro de estos se incluyen arenas, aceites y sales minerales disueltas en el agua potable y sin propiedades combustibles.

Aquellas partículas orgánicas, inorgánicas o líquidos inmiscibles que se encuentran en el agua. Algunos sólidos inorgánicos pueden ser arcillas, limos y u otros componentes del suelo. De la misma forma, pueden ser encontrados sólidos orgánicos como restos de plantas y microorganismos. Sumados a estos sólidos naturales, existen grandes cantidades de sólidos en suspensión orgánicos e inorgánicos, producto de los procesos industriales y domésticos, así como también líquidos inmiscibles como aceites y grasas.

2.1.3.6. Sólidos disueltos

Los sólidos disueltos pueden clasificarse en base a su volatilidad en fijos o volátiles. Los sólidos volátiles en la fracción orgánica de los sólidos o porción de sólidos que se volatiliza calcinando la muestra a una temperatura de 550 más/menos 50 °C. Al residuo de la calcinación se le conoce como sólidos fijos y constituye la porción inorgánica o mineral de los sólidos.

2.1.3.7. Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales es un parámetro importante, ya que contribuye directamente en la calidad del cuerpo receptor, aportando partículas sólidas que pueden tener un efecto sobre la salud de organismos acuáticos y que proporcionan turbidez al agua, limitando la penetración de luz solar en la columna de agua y afectando el proceso fotosintético de las microalgas y perifiton del ecosistema acuático.

Los sólidos suspendidos totales son aquellos que son visibles y flotan en las aguas residuales entre superficie y fondo. Pueden ser removidos por medios físicos o mecánicos a través de procesos de filtración o sedimentación. Los sólidos suspendidos totales son la fracción de sólidos retenidos sobre un filtro con un tamaño de poro específico, medido después de que ha sido secado a una temperatura específica.

Se incluyen en esta clasificación las grandes partículas que flotan, tales como arcilla, sólidos fecales, restos de papel, madera en descomposición, partículas de comida y basura, de los cuales un 70 % son orgánicos y un 30 % inorgánicos.

2.1.3.8. Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno es un parámetro utilizado para medir la concentración del ión hidrógeno en una solución. Es la medida de la concentración de iones o cationes hidrógeno en el agua y es un parámetro importante de calidad tanto en las aguas naturales como en las residuales.

El químico danés Sorensen lo definió como el logaritmo negativo de base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. Esto es:

$$pH = -\log_{10}(H^+)$$

La determinación del pH en el agua es una medida de la tendencia de su acidez o alcalinidad. Un pH menor a 7 indica una tendencia hacia la acidez, mientras que un valor mayor a 7 muestra una tendencia hacia lo alcalino.

“La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Un pH muy ácido o muy alcalino, pueden ser indicio de una contaminación industrial.”⁴

2.1.3.9. Aceites y grasas

Las grasas y aceites son los compuestos de alcohol o glicerol con ácidos grasos. Los ácidos grasos que están en forma líquida a temperaturas ordinarias, son llamados aceites, y aquellos sólidos se llaman grasas. Estos son químicamente bastante similares, están compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno en varias proporciones. Las grasas y aceites que contribuyen a las aguas residuales de tipo doméstico están en la mantequilla, manteca de cerdo, margarina y en aceite graso y vegetal. Las grasas también se encuentran normalmente en las carnes, germen de cereales, semillas, nueces y en ciertas frutas.

⁴ Ibíd. p. 57.

Las grasas están entre los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por medio de bacterias. Los ácidos minerales los atacan, sin embargo, producen la formación de glicerina y ácidos grasos. En presencia de alcalinos, se libera la glicerina, y se forman las sales alcalinas de los ácidos grasos. Estas sales alcalinas son a saber como jabones y como grasas, estos son estables.

El contenido de grasa de las aguas residuales causa muchos problemas que pueden causar severos problemas en el alcantarillado y en las plantas de tratamiento. Si la grasa no es removida antes de la descarga, ésta puede interferir con la vida biológica en las aguas superficiales creando materia flotante de mal aspecto y películas aceitosas.

2.1.3.10. Materia flotante

La materia flotante es la materia o sustancias que permanecen temporal o permanentemente en la superficie del cuerpo de agua, limitando su uso.

2.1.3.11. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro de medición indirecta que mide la cantidad de oxígeno consumido por una población microbiana cultivada en la muestra, por lo que su presencia indica, entonces, la capacidad que tienen los contaminantes de consumir el oxígeno del cuerpo receptor de las aguas residuales por medio de la descomposición biológica en este.

El DBO_{5,20} es la principal prueba utilizada para la evaluación de la naturaleza del agua residual. La DBO_{5,20} se determina a 20°C después de una incubación de cinco días, determinando la cantidad de oxígeno consumido por

las bacterias. Entre mayor $DBO_{5,20}$ haya en las aguas residuales ingresando a un cuerpo de agua superficial, mayor consumo de oxígeno disuelto del sistema. El consumo de oxígeno ocurre naturalmente así como para la degradación de la materia orgánica en el medio, esto implica una baja en la concentración del oxígeno disuelto del medio, puede alcanzar condiciones anaerobias, que afectan la vida de los organismos biológicos.

La demanda de oxígeno de las aguas residuales se debe a tres clases de materiales:

- Materia orgánica carbonosa usada como fuente de alimentación por los organismos aerobios.
- Nitrógeno oxidable derivado de nitritos, amoníaco y compuestos de nitrógeno orgánico, que sirven de sustrato para bacterias específicas del género nitrosomas y nitrobacter, que oxidan al nitrógeno amoniacal en nitritos y nitratos.
- Compuestos reductores químicos, como sulfitos, sulfuros y el ión ferroso que son oxidados por oxígeno disuelto.

2.1.3.12. Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se obtiene por medio de la oxidación del agua residual en una solución ácida de permanganato o dicromato de potasio. Este proceso oxida casi todos los compuestos orgánicos en gas carbónico y en agua. La reacción es completa en más de 95 % de los casos.

La demanda química de oxígeno (DQO) se usa como un indicador de la carga de carbono orgánico total, con la excepción de ciertos compuestos aromáticos. La DQO proporciona la cantidad de oxígeno necesario para oxidar las sustancias orgánicas presentes en una muestra de agua. Representa todo lo que se puede oxidar, particularmente ciertas sales minerales y la mayoría de los compuestos orgánicos.

Este parámetro impacta directamente sobre la salud de los cuerpos de agua, de tal manera que es un indicador de la capacidad que tendrán los contaminantes de reducir el oxígeno disuelto en el cuerpo de agua, al recibir aguas residuales con presencia de DQO.

La ventaja de las mediciones de DQO es que los resultados se obtienen rápidamente (aprox. 3 horas), pero tienen la desventaja de que no ofrecen ninguna información de la proporción del agua residual que puede ser oxidada por las bacterias ni de la velocidad del proceso de biooxidación.

2.1.3.13. Arsénico

El arsénico es utilizado como aditivo de aleación para metales, especialmente plomo y cobre, celdas de batería, envolturas de cable, tubos de caldera, además por el elevado grado de pureza se considera un semiconductor.

El contenido de arsénico en las aguas residuales es de preocupación ya que es un agente carcinógeno y mutágeno. El producto a largo plazo puede causar fatiga y pérdida de energía, así como dermatitis.

2.1.3.14. Cadmio

La presencia de Cadmio en las aguas residuales es de preocupación debido a que es inflamable en forma de polvo, tóxico por inhalación de polvo o humo y carcinógeno, sus compuestos solubles son muy tóxicos. Además, la ingesta a largo plazo del mismo puede causar su concentración en el hígado, riñones, páncreas y tiroides.

2.1.3.15. Coliformes fecales

Los coliformes fecales es un parámetro que indica la presencia de materia fecal en el agua y es un indicador indirecto de posible presencia de patógenos. Por ende, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.

2.2. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales puede clasificarse en tres categorías principales:

- Tratamiento físico
- Tratamiento químico
- Tratamiento biológico

2.2.1. Tratamiento físico

Las operaciones físicas involucran operaciones gravitacionales, manuales o mecánicas, que permiten remover básicamente sólidos de distinta granulometría y densidad del efluente. Dada la gran cantidad de aceites y grasas presentes en los desechos líquidos en las industrias alimenticias, el

sistema típico contempla una o varias unidades desgrasadoras donde se separan y luego son llevados a tratamiento externo o para disposición final. Las operaciones unitarias involucradas son las siguientes:

2.2.1.1. Separación de sólidos gruesos

Para la eliminación de aquellos sólidos de gran tamaño (mayores a 15 mm) que puedan interferir con las posteriores etapas del tratamiento, se deben instalar cámaras de reja de limpieza manual o autolimpiantes. Los sólidos separados mediante este sistema son dispuestos como basura doméstica en rellenos sanitarios, o reciclados hacia otro sector, sí son posibles de clasificar.

2.2.1.2. Separación de sólidos molestos

La industria láctea, por lo general, no contiene sólidos molestos. Sin embargo, en donde existen procesos de envasado, se evacuan hacia el efluente pedazos de plástico, papel aluminizado, entre otros. Estos sólidos no se digieren biológicamente y provocan problemas en las posteriores etapas del tratamiento, razón por la cual es necesario removerlos previamente.

2.2.1.3. Separación de sólidos no putrescibles

Se entiende por tales a las arenas, gravas, cenizas, etc. Para removerlos se utiliza desarenadores, los que pueden ser gravitacionales o aireados. Otra alternativa es utilizar hidrocéntrifugas o hidrociclones, en cuyo caso se requiere necesariamente un bombeo previo del efluente.

2.2.1.4. Separación de sólidos finos

Los sólidos finos comprenden el tamaño entre 0,5 mm y 3 mm, e involucran normalmente sólidos putrescibles, como: restos de queso, cuajada, etc. Para removerlos se utiliza normalmente tamices tipo filtros rotarios auto limpiantes con agua o vapor. El ideal es utilizarlos inmediatamente antes o después del estanque de homogenización. El sólido aquí extraído puede ser reciclado a alimento animal, ya que no involucra componentes nocivos para la alimentación animal como detergentes, los que permanecen en la corriente líquida.

2.2.1.5. Cámara desgrasadora o coalescedores

La cámara desgrasadora o los coalescedores tiene por objetivo remover físicamente aquellas grasas y aceites libres, sin necesidad de incorporar producto químico alguno. Su implementación permite reducir los costos de tratamiento asociados a etapas posteriores.

2.2.1.6. Estanque de ecualización y homogenización

Las aguas procedentes de las diversas secciones donde se generan son recibidas en un tanque de homogenización y ecualización para obtener una calidad homogénea de estas y alimentar las operaciones y procesos siguientes. Tiene el objeto de permitir que el sistema de tratamiento no sufra pérdidas de eficiencia y/o no requiera de continuos, costosos y desfavorables cambios en el programa químico aplicado.

2.2.2. Tratamiento químico

El tratamiento químico involucra la separación de la materia suspendida del efluente. Entre la materia suspendida se incluye a las proteínas, las cuales se coagulan bajo condiciones de balance químico y PH específicas.

2.2.2.1. Ajuste de PH

En el ajuste de PH se realiza la dosificación del agente neutralizante (soda cáustica o ácido sulfúrico), con el objeto de ajustar el pH al nivel óptimo para la posterior etapa de coagulación.

2.2.2.2. Coagulación

El objetivo de la coagulación es neutralizar el potencial del efluente, de forma tal de permitir la formación de coloides, los que darán paso a coágulos. Para efectuar la coagulación existen dos tecnologías, la primera (más común) es la dosificación de una sal química coagulante, mientras que la segunda es electrocoagulación. Las grandes ventajas de la electrocoagulación son la menor generación de lodos, y el menor costo de operación. La desventaja es la alta inversión requerida.

2.2.2.3. Floculación y preparación de polímero

La dosificación del floculante (polielectrolito) permite la formación de coágulos de gran tamaño (flóculos), los que son removidos en la etapa posterior de flotación.

Los sistemas convencionales de preparación y dosificación del polímero son del tipo Batch. Es necesario seleccionar apropiadamente el equipo para esta operación unitaria, de forma tal de no incorporar altas dosis de este producto en los lodos, lo cual sea perjudicial para posteriores aplicaciones.

2.2.2.4. Flotación

La tendencia natural de los sólidos en el efluente lácteo es a flotar y no a sedimentar; por esta razón, se utiliza unidades de flotación para efectuar la separación física de los flóculos. En el proceso de flotación se incorporan microburbujas de aire al efluente en la entrada a la unidad. Estas microburbujas se adsorben a los flóculos bajando su densidad y provocando la flotación natural.

2.2.2.5. Tratamiento biológico

El tratamiento biológico remueve la materia orgánica biodegradable, en solución o suspensión, y los sólidos suspendidos mediante procesos bioquímicos. La desinfección también se puede dar en esta etapa. También aquí se puede presentar la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Aquí se utilizan diversos arreglos de unidades para que se pueda dar la bioasimilación de la materia orgánica presente en el agua residual por medio de la acción de microorganismos de diversas especies.

2.2.2.6. Sedimentación

La sedimentación separa los lodos biológicos generados en el proceso de aireación (lodos activados). El agua clarificada es evacuada a través de un vertedero superior ya en condiciones de ser enviado al cuerpo receptor. Los

lodos biológicos son extraídos desde el fondo del sedimentador, recirculando parte de ellos al estanque de aireación, para mantener una adecuada y equilibrada concentración de microorganismos en la misma. El exceso de lodos fue retirado para su posterior deshidratado y disposición.

2.2.2.7. Irrigación en tierra

La irrigación en tierra se utiliza cuando el terreno no es una limitante, el tratamiento de rieles de la industria láctea puede ser realizado mediante infiltración al terreno o riego de terrenos agrícolas. Para poder aplicar este tipo de tratamiento, se deben considerar las regulaciones locales respecto de emisiones de olor, calidad de agua para riego, contaminación de suelo y de napa subterránea y salud pública, entre otras.

2.3. Reglamento de descargas de aguas residuales de Guatemala (Acuerdo Gubernativo 236-2006)

El Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos, según Acuerdo Gubernativo Número 236-2006, es una normativa para la regulación de la calidad de los vertidos de aguas residuales a cuerpos de agua, alcantarillado público y el reuso, para las aguas ordinarias y especiales, así como para la disposición de lodos. Este reglamento promueve la conservación y mejoramiento del recurso hídrico y establece que la aplicación del mismo compete al MARN, nombrándolo como la entidad con la autorización respectiva para realizar muestreos aleatorios en los vertidos y en los cuerpos receptores, con el fin de vigilar el cumplimiento del reglamento.

El reglamento de descargas de aguas residuales requiere veinte parámetros de calidad del agua para determinar las características del efluente.

Estos incluyen un rango de parámetros físicos, químicos y microbiológicos para proveer información sobre la cual basarse para la evaluación de la calidad del agua. El máximo límite permisible se determina para cada parámetro, pero varía dependiendo del lugar de la descarga de las aguas. Se consideran tres casos: a cuerpos receptores incluyendo esteros, hacia cuerpos receptores para aguas residuales de tipo municipal y al sistema de alcantarillado público.

2.3.1. Parámetros de calidad de agua de los efluentes

En el *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos* se establecen los siguientes veinte parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales:

- Temperatura
- Potencial de hidrógeno
- Grasas y aceites
- Materia flotante
- Sólidos suspendidos totales
- Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius
- Demanda química de oxígeno
- Nitrógeno total
- Fósforo total
- Arsénico
- Cadmio
- Cianuro total
- Cobre
- Cromo hexavalente
- Mercurio
- Níquel

- Plomo
- Zinc
- Color
- Coliformes fecales

2.4. Clasificación industrial internacional uniforme (CIIU)

La clasificación industrial internacional uniforme (CIIU) tiene como objetivo escoger y agrupar los procesos económicos atendiendo a características determinadas con el fin de realizar una clasificación uniforme de las actividades económicas productivas. “La CIIU provee un conjunto de categorías de actividades para que las entidades puedan clasificarse según la actividad económica que realizan. Las categorías de la CIIU se han definido vinculándolas, con la forma en que el proceso económico está estructurado en unidades y con la forma en que se describe ese proceso en las estadísticas económicas.”⁵

2.4.1. Actividades principales, secundarias y auxiliares

Las actividades económicas productivas se definen como una combinación de acciones cuyo resultado es un determinado conjunto de productos; en donde se combinan recursos tales como equipo, mano de obra, técnicas de fabricación o productos para obtener determinados bienes o servicios.

Una actividad se caracteriza por un insumo de recursos, un proceso de producción y la obtención de productos, y por convención, se define como un

⁵ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. p. 37.

proceso que da lugar a un conjunto homogéneo de productos. En este contexto, un conjunto homogéneo de productos son aquellos productos que pertenecen a una misma categoría y cuya producción es característica de una clase (la categoría más detallada) de la clasificación de actividades.

2.4.2. Sección D: industrias manufactureras

Las industrias manufactureras son las que realizan actividades de las unidades que se dedican a la transformación física y química de los materiales, sustancias o componentes en productos nuevos.

Las unidades de la sección de industrias manufactureras se suelen describir como plantas, factorías o fábricas y se caracterizan por la utilización de maquinaria y equipo de manipulación de materiales que funcionan con electricidad.

2.4.2.1. División 15: elaboración de productos alimenticios y bebidas

La industria alimentaria elabora los productos de la agricultura, la ganadería y la pesca para convertirlos en alimentos y bebidas para consumo humano o animal, y comprende la producción de varios productos intermedios que no son directamente productos alimenticios.

Esta división se organiza por actividades que se realizan con los distintos tipos de productos: carne, pescado, fruta, legumbres y hortalizas, grasas y aceites, productos lácteos y otros productos alimenticios y bebidas.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Factor o característica que puede variar en un determinado grupo de individuos o hechos, especialmente cuando se analizan para una investigación.

3.1.1. Análisis de aguas residuales

En cuanto al análisis correlativo de las características de las aguas residuales se basó en siete parámetros que se han considerado representativos, según estudios previos descritos en antecedentes y basados en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, estableciendo las variables de la siguiente manera:

3.1.1.1. Variables independientes

- Grasas y aceites
- Sólidos suspendidos totales
- Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados celsius
- Fósforo total

3.1.1.2. Variables dependientes

- Temperatura
- Demanda química de oxígeno
- Nitrógeno total

3.1.2. Desarrollo del proceso general de tratamiento de aguas residuales

- Operaciones unitarias físicas
- Procesos unitarios químicos
- Procesos unitarios biológicos

Para el análisis en las aguas residuales de sistemas de tratamiento, la metodología que se empleó es la de los análisis de:

- Eficacia y eficiencia
- Mejor tecnología práctica disponible
- Preparación y evaluación de proyectos

3.1.2.1. Procedimientos empleados

- Pre evaluación (elaboración de estudios, recopilación de información, análisis estimado de las variables, industrias y determinación de una estadística adecuada).
- Inicio de actividades (toma de datos de la base existente, pre y pos análisis de datos recabados en MARN; evaluación de sistemas de tratamiento potenciales; Propuesta de la planta de tratamiento).
- Análisis (análisis del correcto uso de datos; evaluación de lo propuesto; diseño del sistema de tratamiento final por proponer).

3.2. Delimitación del campo de estudio

La evaluación de parámetros en la descarga de aguas residuales del grupo de alimentos y bebidas se trabajó en el Ministerio de Ambiente y

Recursos Naturales. El campo de estudio de trabajo fue una muestra de 39 empresas del grupo 15 de la clasificación industrial internacional uniforme (CIIU), basándose en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, y datos obtenidos en estudios técnicos y de monitoreos, así como de registros de la Unidad de recursos hídricos y cuencas y la unidad de calidad ambiental del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Se obtuvieron datos de 39 industrias alimenticias del área metropolitana de Guatemala, al obtener los valores de demanda química de oxígeno (DQO), aceites y grasas (A&G), sólidos suspendidos (S.S.), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), temperatura (T^oc), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), los cuales se correlacionaron estadísticamente. Los datos resultantes fueron procesados valiéndose de bibliografía y el programa de microsoft excel, para poder generar la propuesta final de un proceso de tratamiento de aguas residuales general para todo el grupo industrial

3.3. Recursos humanos disponibles

- Persona que realizó el estudio: Raúl Alejandro Urízar Ramírez
 - Asesor: Ing. Guillervin Adolfo Macario Castro, colegiado núm. 1,465.
 - Asesores del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

3.4. Recursos materiales disponibles

Se valió de actividades de colección de datos en registros y documentos ambientales, así como del registro de entes generadores de la Unidad de Recursos Hídricos y cuencas y de la Unidad de calidad ambiental del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

Se utilizó el programa de microsoft excel en donde se ordenaron y procesaron los datos. No fue requerido captar muestras y, por ende, enviar para su análisis en el Laboratorio Nacional de Salud del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

3.4.1. Proceso de cumplimiento de objetivos

Por lo normal, es comprensible entender y respetar la secuencia cronológica de las actividades nos facilita el cumplimiento de los objetivos organizacionales.

3.4.1.1. Procesamiento de la información

- Escritorio y materiales de oficina
- Equipo de cómputo
- Equipo mobiliario
- Registro de entes generadores de la URHyC del MARN
- Normativas de aplicación en la URHyC del MARN
- Material bibliográfico
- Programa microsoft excel

3.4.1.2. Compilación de información

- Boleta de datos del MARN

3.5. Técnica cualitativa y cuantitativa

El estudio realizado se basó en una serie de datos recabados en los diversos archivos del MARN, todo esto conllevó a las técnicas de la

observación, inducción, deducción y evaluación de los datos obtenidos en los documentos a partir de información recolectada, lo cual define que la técnica utilizada para dicho estudio es cuantitativa, debido a que es una investigación, exploratoria, inductiva y descriptiva que comprende los datos mediante un análisis exhaustivo y diverso.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Es una dimensión o una característica de una unidad de análisis, dimensión que adopta la forma de una clasificación.

3.6.1. Análisis y discusión de datos

Posterior a la recolección de datos, estos previamente fueron considerados por el personal del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales para luego ser procesados utilizando el programa microsoft excel para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

3.6.2. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

El ordenamiento de información del registro de entes generadores e instrumentos ambientales fue utilizado como herramienta principal, para el ingreso de la información en el programa de microsoft excel, en base al siguiente procedimiento:

- Obtención de datos.
- Ingreso de datos una hoja electrónica de microsoft excel.

- Verificar datos para corroborar que no existan errores en digitación o inconsistencias en el contenido.
- Modelar las industrias y procesar la información.

3.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico utilizado fue la estadística descriptiva gráfica y numérica para cada una de las variables en cuestión, se hizo uso de las medidas de tendencia central y desviación estándar.

Además, se utilizaron errores absolutos, errores relativos y errores relativos porcentuales, mediante la comparación de los datos obtenidos en los expedientes relacionados con agua residual y los límites máximos permisibles establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

3.7.1. Datos recolectados

Tabla I. Datos reales de parámetros analizados del sector de alimentos, basados en reportes realizados al Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

Número de datos	Temperatura [°C]	Sólidos Suspendidos (S.S) [mg/L]	Demanda Química de Oxígeno [mg/L]	Demanda Biológica de Oxígeno [mg/L]	Nitrógeno Total [mg/L]	Fósforo Total [mg/L]	Aceites Grasas [mg/L]
1	26,5	299	1 743	2 170	62,5	33,1	617,2
2	34,3	238	1 026	704	32,5	19,3	172,6
3	23,0	540	1 142	800	81,4	34,3	818,8
4	25,3	44	2 305	1 977	2,0	10,0	3 629,0
5	23,4	211	700	567	1,1	7,8	558,8
6	26,6	111	1 554	1 070	6,5	1,7	199,6
7	21,6	218	955	625	14,0	31,5	154,0
8	26,0	147	426	262	7,1	5,7	10,0
9	22,7	1 110	31 925	20	60,0	0,7	156,8
10	20,0	70	2 047	339	0,7	9,0	1 962,0
11	19,7	471	3 108	1 751	4,7	2,3	286,1
12	26,6	405	2 466	1 285	6,7	19,5	313,8
13	29,7	202	925	295	28,5	11,5	768,0
14	29,1	97	105	58	12,8	3,1	203,2
15	23,0	456	5 135	3 387	3,4	23,5	433,3

Continuación de la tabla I.

Número de datos	Temperatura [°C]	Solidos Suspendidos (S.S) [mg/L]	Demanda Química de Oxígeno [mg/L]	Demanda Biológica de Oxígeno [mg/L]	Nitrógeno Total [mg/L]	Fósforo Total [mg/L]	Aceites Grasas [mg/L]
16	34,1	1 088	3 456	2 552	36,0	5,1	1 300,5
17	22,3	1 814	19 050	14 680	81,0	6,5	363,6
18	26,8	430	3 108	1 236	7,5	1,5	28,6
19	21,5	6 280	9 200	642	54,0	21,6	127,8
20	22,2	579	6 120	3 924	43,5	18,1	456,0
21	20,5	237	602	315	2,5	0,9	63,8
22	22,9	616	2 609	466	33,0	3,0	10,0
23	29,0	1 038	7 980	2 399	22,5	4,4	416,4
24	26,0	1 798	24 850	5 080	85,0	3,7	142,2
25	32,0	14	3 050	14	11,0	0,1	27,6
26	31,9	135	4 535	1 765	5,4	2,7	197,5
27	23,3	182	690	472	21,0	5,9	473,0
28	19,0	56	495	228	14,9	3,3	428,4
29	26,8	922	5 880	1 863	0,7	17,0	1 810,9
30	19,6	3 194	22 590	4 100	125,0	15,0	685,9
31	25,0	608	2 463	1 892	30,5	2,6	866,1
32	25,1	401	4 428	3 362	3,3	5,2	72,0
33	23,2	113	5 760	988	28,0	14,5	332,8
34	28,9	133	1 358	20	24,5	33,4	44,8
35	29,6	27	111	58	5,1	9,6	240,6
36	21,9	23	1 590	118	3,0	0,3	202,2
37	25,7	446	1 182	682	0,5	7,5	886,2
38	24,0	76	1 166	276	19,5	0,6	406,8
39	22,0	25	30	20	1,4	0,5	184,1

Fuente: tomados de la base de datos del MARN, datos reportados en los informes de análisis a empresas generadoras, basado en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

3.7.2. Análisis calculado para temperatura

El análisis presentado a continuación fue realizado para temperatura, el cual permite conocer la capacidad de agrupación de los datos reales obtenidos en campo; de igual manera la operación se realizó con los parámetros de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, solidos suspendidos, aceites y grasas, nitrógeno y fósforo total.

Tabla II. **Evaluación de la tendencia de la temperatura para las diferentes industrias del sector de alimentos**

Núm. De Datos	Serie Original (Xi)	Serie Transformada		Serie Estandarizada (Zi)
	Temperatura [°C]	Y = Log x	Y= ln X	Zi = (Xi-Media)/Desviación Estándar
1	26,5	1,4232	3,2771	0,341
2	34,3	1,5353	3,5351	2,310
3	23,0	1,3617	3,1355	-0,542
4	25,3	1,4031	3,2308	0,038
5	23,4	1,3692	3,1527	-0,441
6	26,6	1,4249	3,2809	0,366
7	21,6	1,3345	3,0727	-0,896
8	26,0	1,4150	3,2581	0,215
9	22,7	1,3560	3,1224	-0,618
10	20,0	1,3010	2,9957	-1,300
11	19,7	1,2945	2,9806	-1,376
12	26,6	1,4249	3,2809	0,366
13	29,7	1,4728	3,3911	1,149
14	29,1	1,4639	3,3707	0,998
15	23,0	1,3617	3,1355	-0,542
16	34,1	1,5328	3,5293	2,260
17	22,3	1,3483	3,1046	-0,719
18	26,8	1,4281	3,2884	0,417
19	21,5	1,3324	3,0681	-0,921
20	22,2	1,3464	3,1001	-0,744
21	20,5	1,3118	3,0204	-1,174
22	22,9	1,3598	3,1311	-0,568
23	29,0	1,4624	3,3673	0,972
24	26,0	1,4150	3,2581	0,215
25	32,0	1,5051	3,4657	1,730
26	31,9	1,5037	3,4626	1,704
27	23,3	1,3673	3,1484	-0,467
28	19,0	1,2788	2,9444	-1,552
29	26,8	1,4281	3,2884	0,417
30	19,6	1,2923	2,9755	-1,401
31	25,0	1,3979	3,2189	-0,038
32	25,1	1,3997	3,2229	-0,012
33	23,2	1,3655	3,1442	-0,492
34	28,9	1,4609	3,3638	0,947
35	29,6	1,4713	3,3878	1,124
36	21,9	1,3404	3,0865	-0,820
37	25,7	1,4099	3,2465	0,139
38	24,0	1,3802	3,1781	-0,290
39	22,0	1,3424	3,0910	-0,795

Fuente: datos obtenidos por medio de cálculos a partir de los datos reales de los parámetros analizados y la aplicación de estadística descriptiva.

Tabla III. **Parámetros de agrupación y validación por prueba de desfases de Cramer**

Núm. de datos	Prueba de Cramer			Error
	b1	b2	b3	
1	26,5	26,5	26,5	1,847
2	34,3	34,3	34,3	83,887
3	23	23	23	4,584
4	25	25	25	0,020
5	23,4	23,4	23,4	3,031
6	26,6	26,6	26,6	2,129
7	21,6	21,6	21,6	12,539
8	26	26	26	0,738
9	22,7	22,7	22,7	5,959
10	20	20	20	26,430
11	19,7	19,7	19,7	29,605
12	26,6	26,6	26,6	2,129
13	29,7	29,7		20,784
14	29,1	29,1		15,673
15	23	23		4,584
16	34,1	34,1		80,263
17	22,3	22,3		8,071
18	26,8	26,8		2,752
19	21,5	21,5		13,257
20	22,2	22,2		8,650
21	20,5	20,5		21,539
22	22,9	22,9		5,022
23	29	29		14,892
24	26			0,738
25	32			47,046
26	31,9			45,684
27	23,3			3,389
28	19			37,712
29	26,8			2,752
30	19,6			30,703
31	25			0,020
32	25,1			0,002
33	23,2			3,768
34	28,9			14,130
35	29,6			19,882
36	21,9			10,504

Continuación de la tabla III.

Núm. de datos	Prueba de Cramer			Error
	b1	b2	b3	
37	25,7			0,312
38	24			1,302
39	22			9,866

Núm. Datos	39	23	12	Error total
Media	25,141	25,0652	24,617	596,194
Error S2	3,96098			
Error τ		-0,0191	-0,132	
t Real		7,29164	4,0201	
t Teórico		2,07961	2,2281	
Conclusión:	La serie es heterogénea			

Fuente: datos obtenidos por medio de cálculos a partir de los datos reales de los parámetros analizados y la aplicación de estadística descriptiva.

Tabla IV. **Parámetros de agrupación y validación por “t” de Student**

Prueba t de Student	
b1	b2
26,5	20,5
34,3	22,9
23	29
25	26
23,4	32
26,6	31,9
21,6	23,3
26	19
22,7	26,8
20	19,6
19,7	25
26,6	25,1
29,7	23,2

Continuación de la tabla IV:

Prueba t de Student	
b1	b2
29,1	28,9
23	29,6
34,1	21,9
22,3	25,7
26,8	24
21,5	22
22,2	

Núm. datos	20	19
Media	25,205	25,0736842
Error S2	17,2026053	14,954269
t Real	0,2889793	
t Teórico	2,02269092	
Conclusión:	La serie es homogénea	

Fuente: datos obtenidos por medio de cálculos a partir de los datos reales de los parámetros analizados y la aplicación de estadística descriptiva.

Tabla V. **Parámetros de agrupación y validación**

	Parámetro analizado	Serie original	Y=log (x)	Y=ln(x)
Parámetros de tendencia central	Media aritmética	25,016	1,393	3,208
	Media geométrica	24,733	1,392	3,205
	Media armónica	24,462	1,390	3,201
	Mediana	25,000	1,398	3,219
	Moda	23,000	1,362	3,135
Parámetros de dispersión	Rango	15,300	0,257	0,591
	Varianza	15,182	0,004	0,023
	Desviación	3,896	0,066	0,152
	Coefficiente de variación	0,156	0,047	0,047
Parámetros de forma	Cesgo	0,658	0,331	0,331
	Curtosis	0,013	-0,428	-0,428

Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Tabla VI. **Papel probabilístico tendencia normal de temperatura**

Tendencia normal de temperatura						Error cuadrático	
Núm. de dato	Xa-z	z	q	p	tr	Xe	Error
28	19	-1,550	0,061	0,939	1,064	17,378	2,632
30	19,6	-1,399	0,081	0,919	1,088	18,626	0,949
11	19,7	-1,374	0,085	0,915	1,093	19,439	0,068
10	20	-1,298	0,097	0,903	1,108	20,065	0,004
21	20,5	-1,172	0,121	0,879	1,137	20,585	0,007
19	21,5	-0,919	0,179	0,821	1,218	21,036	0,216
7	21,6	-0,894	0,186	0,814	1,228	21,439	0,026
36	21,9	-0,818	0,207	0,793	1,260	21,807	0,009
39	22	-0,793	0,214	0,786	1,272	22,149	0,022
20	22,2	-0,743	0,229	0,771	1,297	22,469	0,073
17	22,3	-0,717	0,237	0,763	1,310	22,773	0,224
9	22,7	-0,616	0,269	0,731	1,368	23,064	0,132
22	22,9	-0,566	0,286	0,714	1,400	23,344	0,197
3	23	-0,541	0,294	0,706	1,417	23,615	0,378
15	23	-0,541	0,294	0,706	1,417	23,879	0,772
33	23,2	-0,490	0,312	0,688	1,454	24,138	0,879
27	23,3	-0,465	0,321	0,679	1,473	24,392	1,192
5	23,4	-0,440	0,330	0,670	1,493	24,643	1,546
38	24	-0,288	0,387	0,613	1,630	24,893	0,797
4	25	-0,036	0,486	0,514	1,945	25,141	0,020
31	25	-0,036	0,486	0,514	1,945	25,389	0,152
32	25,1	-0,010	0,496	0,504	1,984	25,639	0,290
37	25,7	0,141	0,556	0,444	2,253	25,890	0,036
8	26	0,217	0,586	0,414	2,415	26,145	0,021
24	26	0,217	0,586	0,414	2,415	26,403	0,163
1	26,5	0,343	0,634	0,366	2,734	26,667	0,028
6	26,6	0,368	0,644	0,356	2,807	26,938	0,114
12	26,6	0,368	0,644	0,356	2,807	27,218	0,382
18	26,8	0,419	0,662	0,338	2,961	27,509	0,502
29	26,8	0,419	0,662	0,338	2,961	27,813	1,025
34	28,9	0,949	0,829	0,171	5,837	28,133	0,588
23	29	0,974	0,835	0,165	6,062	28,475	0,276
14	29,1	0,999	0,841	0,159	6,298	28,843	0,066
35	29,6	1,126	0,870	0,130	7,684	29,246	0,125
13	29,7	1,151	0,875	0,125	8,008	29,698	0,000

Continuación de la tabla VI.

Tendencia normal de temperatura						Error cuadrático	
Núm. de dato	Xa-z	z	q	p	tr	Xe	Error
26	31,9	1,706	0,956	0,044	22,744	30,217	2,832
25	32	1,732	0,958	0,042	23,999	30,843	1,339
16	34,1	2,262	0,988	0,012	84,356	31,656	5,972
2	34,3	2,312	0,990	0,010	96,334	32,904	1,948
Media	25,141					Error	5,099
Desviación Estándar	3,961						

Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Tabla VII. **Papel probabilístico tendencia Galton de temperatura**

Tendencia Galton de temperatura							Error cuadrático	
Núm. de dato	Xa-z	X	z	q	p	tr	Xe	Error
28	19	1,279	-1,747	0,040	0,960	1,042	18,387	0,376
30	19,6	1,292	-1,544	0,061	0,939	1,065	19,299	0,091
11	19,7	1,294	-1,511	0,065	0,935	1,070	19,918	0,047
10	20	1,301	-1,413	0,079	0,921	1,086	20,407	0,166
21	20,5	1,312	-1,252	0,105	0,895	1,118	20,823	0,104
19	21,5	1,332	-0,942	0,173	0,827	1,209	21,191	0,096
7	21,6	1,334	-0,912	0,181	0,819	1,221	21,525	0,006
36	21,9	1,340	-0,822	0,205	0,795	1,259	21,835	0,004
39	22	1,342	-0,792	0,214	0,786	1,272	22,126	0,016
20	22,2	1,346	-0,734	0,232	0,768	1,301	22,403	0,041
17	22,3	1,348	-0,704	0,241	0,759	1,317	22,668	0,136
9	22,7	1,356	-0,589	0,278	0,722	1,385	22,925	0,051
22	22,9	1,360	-0,532	0,298	0,702	1,423	23,176	0,076
3	23	1,362	-0,503	0,307	0,693	1,444	23,421	0,177
15	23	1,362	-0,503	0,307	0,693	1,444	23,662	0,438
33	23,2	1,365	-0,447	0,327	0,673	1,487	23,900	0,491
27	23,3	1,367	-0,419	0,338	0,662	1,510	24,137	0,701
5	23,4	1,369	-0,391	0,348	0,652	1,533	24,374	0,949
38	24	1,380	-0,226	0,410	0,590	1,696	24,611	0,373
4	25	1,398	0,039	0,516	0,484	2,065	24,849	0,023

Continuación de la tabla VII.

Tendencia Galton de temperatura							Error cuadrático	
Núm. de dato	Xa-z	X	z	q	p	tr	Xe	Error
31	25	1,398	0,039	0,516	0,484	2,065	25,090	0,008
32	25,1	1,400	0,065	0,526	0,474	2,110	25,334	0,055
37	25,7	1,410	0,219	0,587	0,413	2,420	25,582	0,014
8	26	1,415	0,295	0,616	0,384	2,603	25,836	0,027
24	26	1,415	0,295	0,616	0,384	2,603	26,096	0,009
1	26,5	1,423	0,419	0,662	0,338	2,961	26,365	0,018
6	26,6	1,425	0,443	0,671	0,329	3,041	26,644	0,002
12	26,6	1,425	0,443	0,671	0,329	3,041	26,935	0,112
18	26,8	1,428	0,492	0,689	0,311	3,211	27,240	0,194
29	26,8	1,428	0,492	0,689	0,311	3,211	27,563	0,582
34	28,9	1,461	0,983	0,837	0,163	6,140	27,908	0,984
23	29	1,462	1,005	0,843	0,157	6,353	28,280	0,518
14	29,1	1,464	1,028	0,848	0,152	6,576	28,687	0,171
35	29,6	1,471	1,138	0,873	0,127	7,845	29,140	0,212
13	29,7	1,473	1,160	0,877	0,123	8,134	29,654	0,002
26	31,9	1,504	1,625	0,948	0,052	19,217	30,258	2,696
25	32	1,505	1,646	0,950	0,050	20,038	31,002	0,997
16	34,1	1,533	2,059	0,980	0,020	50,690	31,995	4,429
2	34,3	1,535	2,097	0,982	0,018	55,628	33,583	0,514
Media	25,141	1,395					Error	3,988
Desviación Estándar	3,961	0,067						

Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Tabla VIII. **Papel probabilístico tendencia real de temperatura**

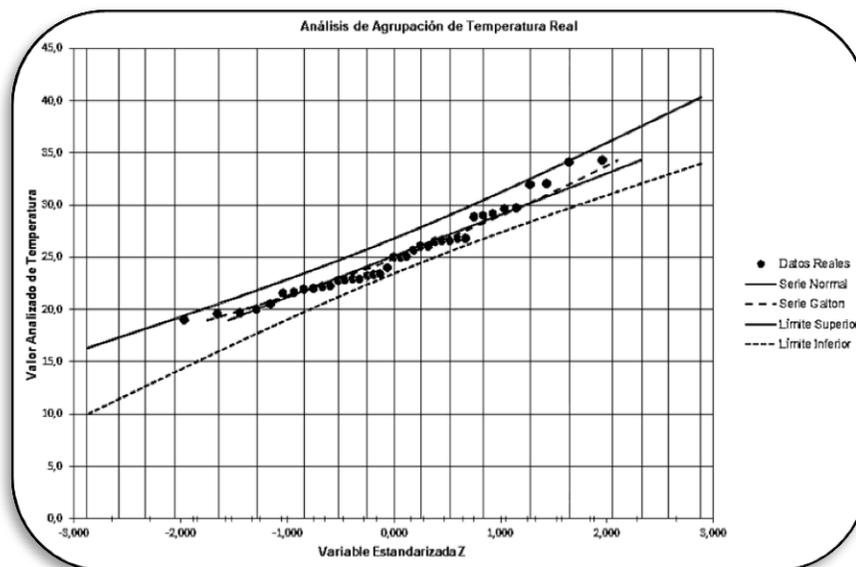
Núm. de dato	Xa-z	Posición (m)	Posición de graficación (fn Weibull) (q)	p	z	tr
28	19,0	1	0,025	0,975	-1,960	1,026
30	19,6	2	0,050	0,950	-1,645	1,053
11	19,7	3	0,075	0,925	-1,440	1,081
10	20,0	4	0,100	0,900	-1,282	1,111
21	20,5	5	0,125	0,875	-1,150	1,143
19	21,5	6	0,150	0,850	-1,036	1,176
7	21,6	7	0,175	0,825	-0,935	1,212
36	21,9	8	0,200	0,800	-0,842	1,250
39	22,0	9	0,225	0,775	-0,755	1,290
20	22,2	10	0,250	0,750	-0,674	1,333
17	22,3	11	0,275	0,725	-0,598	1,379
9	22,7	12	0,300	0,700	-0,524	1,429
22	22,9	13	0,325	0,675	-0,454	1,481
3	23,0	14	0,350	0,650	-0,385	1,538
15	23,0	15	0,375	0,625	-0,319	1,600
33	23,2	16	0,400	0,600	-0,253	1,667
27	23,3	17	0,425	0,575	-0,189	1,739
5	23,4	18	0,450	0,550	-0,126	1,818
38	24,0	19	0,475	0,525	-0,063	1,905
4	25,0	20	0,500	0,500	0,000	2,000
31	25,0	21	0,525	0,475	0,063	2,105
32	25,1	22	0,550	0,450	0,126	2,222
37	25,7	23	0,575	0,425	0,189	2,353
8	26,0	24	0,600	0,400	0,253	2,500
24	26,0	25	0,625	0,375	0,319	2,667
1	26,5	26	0,650	0,350	0,385	2,857
6	26,6	27	0,675	0,325	0,454	3,077
12	26,6	28	0,700	0,300	0,524	3,333
18	26,8	29	0,725	0,275	0,598	3,636
29	26,8	30	0,750	0,250	0,674	4,000
34	28,9	31	0,775	0,225	0,755	4,444
23	29,0	32	0,800	0,200	0,842	5,000
14	29,1	33	0,825	0,175	0,935	5,714
35	29,6	34	0,850	0,150	1,036	6,667
13	29,7	35	0,875	0,125	1,150	8,000

Continuación de la tabla VIII.

Núm. de dato	Xa-z	Posición (m)	Posición de graficación (fn Weibull) (q)	p	z	tr
26	31,9	36	0,900	0,100	1,282	10,000
25	32,0	37	0,925	0,075	1,440	13,333
16	34,1	38	0,950	0,050	1,645	20,000
2	34,3	39	0,975	0,025	1,960	40,000
Media	25,14					
Desviación Estándar	3,961					

Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 1. **Análisis gráfico del papel probabilístico para datos reales de temperatura**



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Tabla IX. **Datos para la generación de modelo determinístico del nitrógeno y fósforo total**

Núm. de datos	Nitrógeno total ^{mg/L}	Fosforo total ^{mg/L}	Fosforo total estimado [Y Teórico]
	[X Observado] eje Horizontal	[Y Observado] eje vertical	Y = 6.4538ln(X) + 0.176
1	62,5	33,1	26,9
2	32,5	19,3	22,6
3	81,4	34,3	28,6
4	2,0	103,0	4,6
5	1,1	7,8	0,8
6	6,5	1,7	12,3
7	14,0	31,5	17,2
8	7,1	5,7	12,8
9	60,0	0,7	26,6
10	0,7	9,0	-2,1
11	4,7	2,3	10,2
12	6,7	19,5	12,5
13	28,5	11,5	21,8
14	12,8	3,1	16,6
15	3,4	23,5	8,1
16	36,0	5,1	23,3
17	81,0	6,5	28,5
18	7,5	1,5	13,2
19	54,0	21,6	25,9
20	43,5	18,1	24,5
21	2,5	0,9	6,1
22	33,0	3,0	22,7
23	22,5	4,4	20,3
24	85,0	3,7	28,8
25	11,0	0,1	15,7
26	5,4	2,7	11,1
27	21	5,9	19,8
28	14,9	3,3	17,6
29	0,7	17,0	-2,1
30	1250,0	155,0	46,2
31	30,5	2,6	22,2
32	3,3	5,2	7,9
33	28,0	14,5	21,7
34	24,5	33,4	20,8
35	5,1	9,6	10,7
36	3,0	0,3	7,3
37	0,5	7,5	-4,3
38	19,5	0,6	19,3
39	1,4	0,5	2,3

Fuente: datos obtenidos por medio de cálculos a partir de los datos reales de los parámetros analizados y la aplicación de estadística de modelo determinístico.

Tabla X. **Datos de análisis de errores, por medio de correlograma para la relación de fósforo y nitrógeno totales**

CORRELOGRAMA					
Núm. de datos	Errores [Y Observado]- [Y Teórico]	Núm. se serie	Valor "r" de Pearson	Limites	
				Superior	Inferior
1	6,2	0	1	0,690	-0,690
2	-3,3	1	0,072	0,686	-0,686
3	5,7	2	-0,072	0,682	-0,682
4	98,4	3	0,071	0,678	-0,678
5	7,0	4	0,036	0,673	-0,673
6	-10,6	5	-0,081	0,669	-0,669
7	14,3	6	-0,083	0,664	-0,664
8	-7,1	7	0,020	0,659	-0,659
9	-25,9	8	-0,048	0,654	-0,654
10	11,1	9	-0,049	0,648	-0,648
11	-7,9	10	-0,095	0,642	-0,642
12	7,0	11	0,127	0,636	-0,636
13	-10,3	12	-0,227	0,630	-0,630
14	-13,5	13	-0,303	0,623	-0,623
15	15,4	14	-0,096	0,616	-0,616
16	-18,2	15	0,119	0,608	-0,608
17	-22,0	16	-0,130	0,600	-0,600
18	-11,7	17	-0,103	0,592	-0,592
19	-4,3	18	-0,076	0,583	-0,583
20	-6,4	19	-0,119	0,573	-0,573
21	-5,2	20			
22	-19,7	21			
23	-15,9	22			
24	-25,1	23			
25	-15,6	24			
26	-8,4	25			
27	-13,9	26			
28	-14,3	27			
29	19,1	28			
30	108,8	29			
31	-19,6	30			
32	-2,7	31			
33	-7,2	32			
34	12,6	33			
35	-1,1	34			
36	-7,0	35			
37	11,8	36			
38	-18,7	37			
39	-1,8	38			

Fuente: datos de error obtenidos del modelo determinístico de nitrógeno y fósforo total para la validación de la ecuación de correlación obtenida.

3.7.3. Análisis realizado en correlación DQO, DBO, SS, A&G

En la tabla XXII se muestran resultados obtenidos para la generación del modelo múltiple basado en los datos reales.

Tabla XI. **Datos obtenidos para la generación del modelo múltiple basado en los datos reales**

ESTADÍSTICA DE LA REGRESIÓN	Análisis aplicado		Resultado			
	Coeficiente de correlación múltiple		0,95148756			
	Coeficiente de determinación R²		0,905328577			
	R ² ajustado		0,897213884			
	Error típico		11572,88276			
	Observaciones		39			
ANÁLISIS DE VARIANZA	<i>Parámetro</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
	Regresión	3	44826876175	14942292058	111,566	5,579E-18
	Residuos	35	4687606538	133931615,4		
	Total	38	49514482712			
COEFICIENTES DEL MODELO MÚLTIPLE	<i>Tipo de variable</i>		<i>Coefficientes</i>			
	Valor constante		-2551,625255			
	Variable X 1 (DBO)		4,858703434			
	Variable X 2 (SS)		0,291377482			
	Variable X 3 (A&G)		-1,205530425			

Fuente: datos obtenidos por la extensión de aplicación para análisis de datos en relación a modelos múltiples, basados en los datos reales de reportes presentados al MARN.

Tabla XII. Datos obtenidos al aplicar los coeficientes del modelo múltiple utilizando datos reales y su relación de error

Núm. de datos	DATOS REALES vs MODELADO			ANÁLISIS DE ERROR			
	Y observada	Y estimada (modelada)	Valor patrón Xi DBO ^{mg/L}	Valor constante de Error	Límite superior	Límite inferior	Error aplicado
1	1743	7334,829686	2170	1,00	12013,00	2656,66	5591,83
2	1026	730,1752519	704	1,04	5566,32	-4105,97	295,82
3	1142	505,5930204	800	1,03	5325,26	-4314,08	636,41
4	2305	2691,98213	1977	1,00	7379,17	-1995,21	386,98
5	700	-408,9101608	567	1,04	4452,18	-5270,00	1108,91
6	1554	2438,906447	1070	1,02	7216,70	-2338,88	884,91
7	955	362,9329969	625	1,04	5213,26	-4487,39	592,07
8	426	-1247,86777	262	1,05	3674,61	-6170,34	1673,87
9	31925	-320,049352	20	1,07	2656,73	-7296,83	34245,05
10	2047	-3249,379062	339	1,05	1656,84	-8155,60	5296,38
11	3108	5748,300998	1751	1,01	10450,68	1045,92	2640,30
12	2466	3431,521091	1285	1,02	8180,77	-1317,73	965,52
13	925	-1985,296857	295	1,05	2930,15	-6900,74	2910,30
14	105	-2486,520623	58	1,06	2481,41	-7454,45	2591,52
15	5135	13515,31508	3387	1,01	18221,11	8809,52	8380,32
16	3456	8597,012292	2552	1,00	13268,14	3925,88	5141,01
17	19050	68864,36905	14680	2,03	78338,16	59390,57	49814,37
18	3108	3544,546337	1236	1,02	8299,92	-1210,83	436,55
19	9200	18713,26696	642	1,04	23560,50	13866,04	9513,27
20	6120	16132,91271	3924	1,02	20896,69	11369,13	10012,91
21	602	-1028,990051	315	1,05	3882,24	-5940,22	1630,99
22	2609	-120,03623	466	1,04	4760,49	-5000,56	2729,04
23	7980	8904,871241	2399	1,00	13577,09	4232,65	924,87
24	24850	22483,05848	5080	1,07	27460,90	17505,22	2366,94
25	3050	-2512,796762	14	1,07	2465,39	-7490,99	5562,80
26	4535	5825,230007	1765	1,01	10526,53	1123,93	1290,23
27	690	-775,5024236	472	1,04	4103,84	-5654,85	1465,50
28	495	-1943,972967	228	1,06	2985,84	-6873,78	2438,97
29	5880	4585,694234	1863	1,00	9279,93	-108,54	1294,31
30	225900	205137,27	41000	5,68	231674,54	178600,00	20762,73
31	2463	5774,08925	1892	1,00	10466,41	1081,77	3311,09
32	4428	13813,37987	3362	1,01	18517,15	9109,61	9385,38
33	5760	1880,498868	988	1,03	6670,30	-2909,31	3879,50
34	1358	-2469,705744	20	1,07	2507,08	-7446,49	3827,71
35	111	-2552,003884	58	1,06	2415,93	-7519,94	2663,00
36	1590	-2215,35482	118	1,06	2738,85	-7169,56	3805,35
37	1182	-176,3762188	682	1,04	4663,67	-5016,42	1358,38
38	1166	-1678,888196	276	1,05	3240,59	-6598,37	2844,89
39	30	-2669,104901	20	1,07	2307,68	-7645,89	2699,10

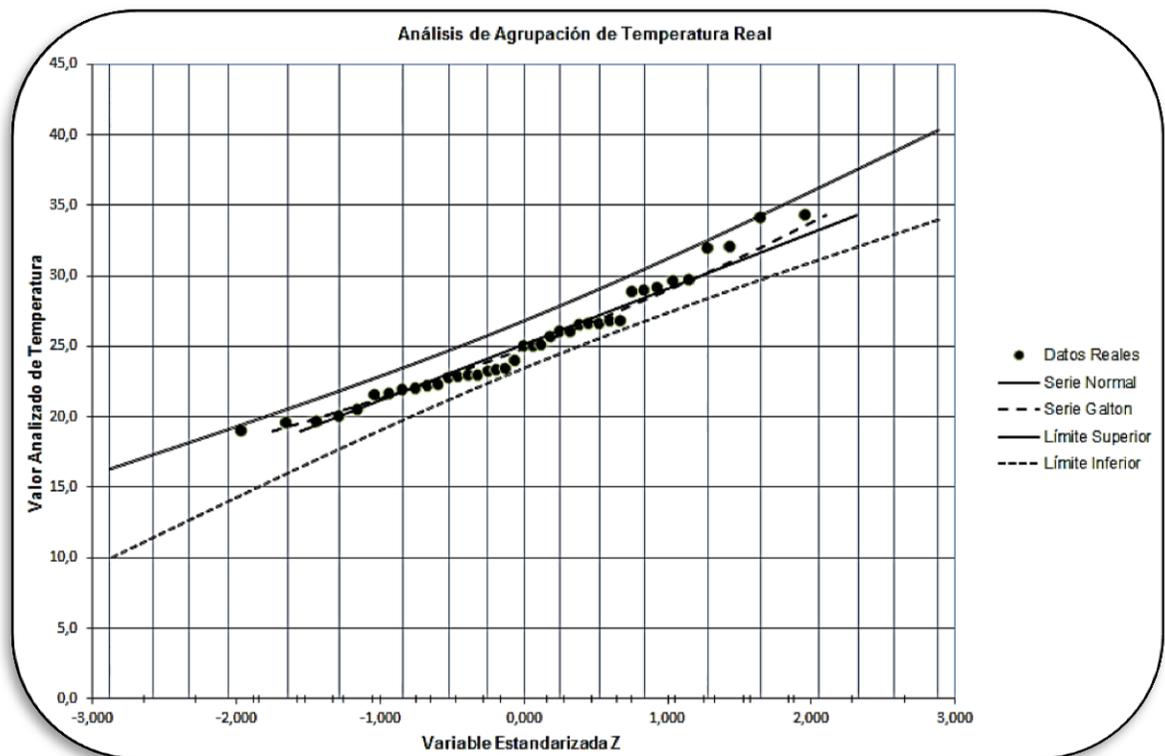
Fuente: datos obtenidos por la extensión de aplicación para análisis de datos en relación a modelos múltiples, basados en los datos reales de reportes presentados al MARN.

4. RESULTADOS

4.1. Determinación de la agrupación de los parámetros representativos del sector de alimentos

- Análisis de 39 datos de temperatura

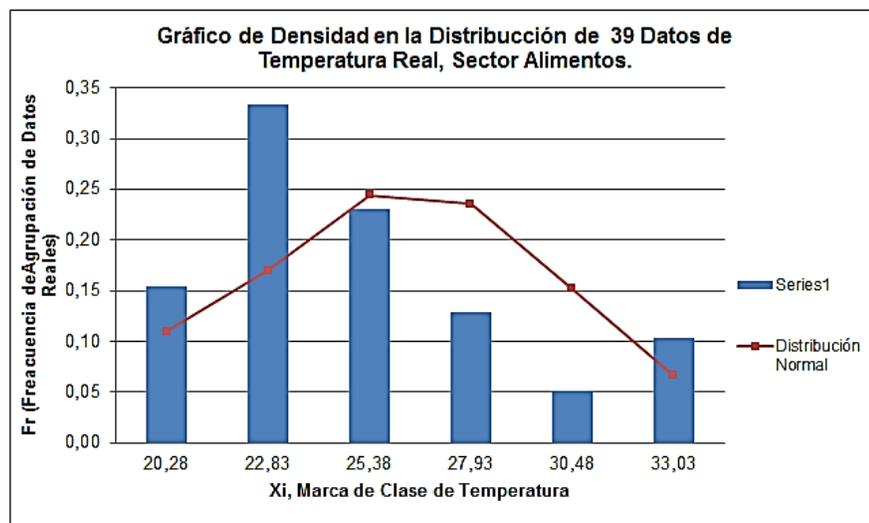
Figura 2. Gráfica de papel probabilístico de temperatura



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Al realizar los análisis de papel probabilístico es posible visualizar las tendencias de las temperaturas de descarga de las 39 industrias evaluadas, demostrando que es posible agrupar los valores con errores menores a 95 % de permisividad, demostrado homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,288979299) menor a t teórico (2,02269092).

Figura 3. **Gráfica de distribución normal de temperatura**



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

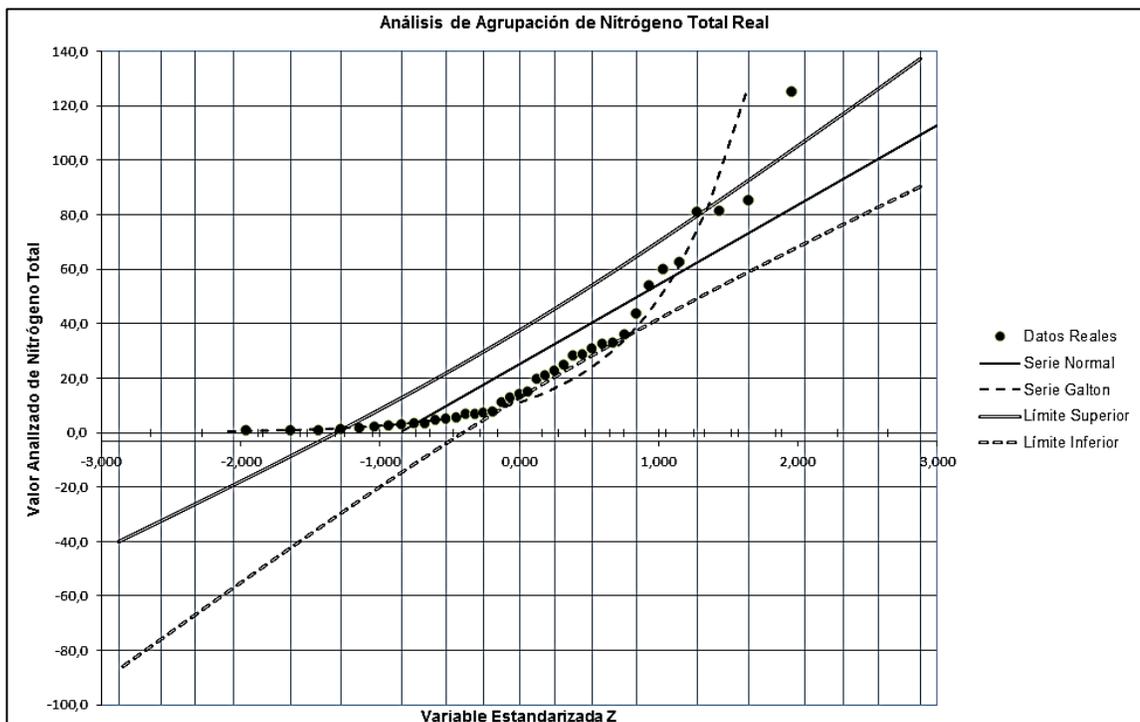
En la figura 3 se demuestra la distribución normal inclinada a izquierda con leve achatamiento de la campana normal.

4.1.1. **Análisis de 39 datos de nitrógeno total**

El análisis gráfico del nitrógeno total demuestra que existen errores para un valor de 95 % de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t Real

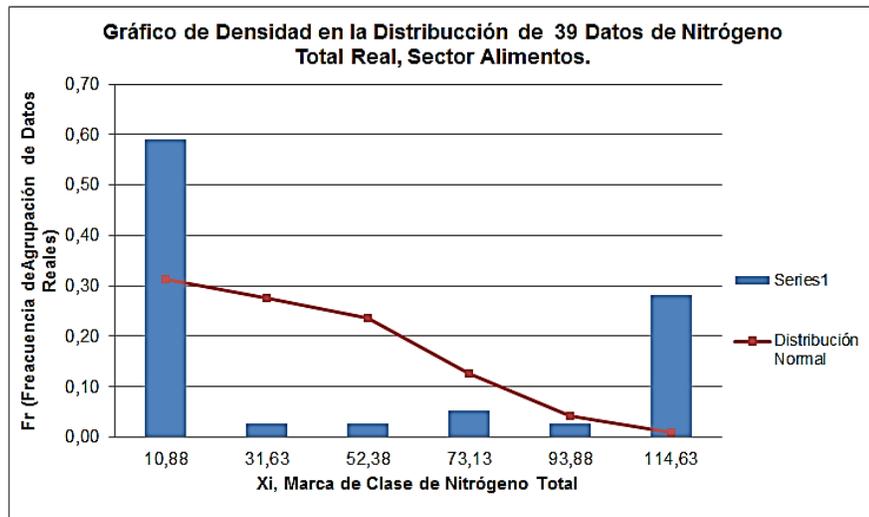
(0,224658704) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 4. Gráfica de papel probabilístico de nitrógeno total



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 5. **Gráfica de distribución normal de nitrógeno total**

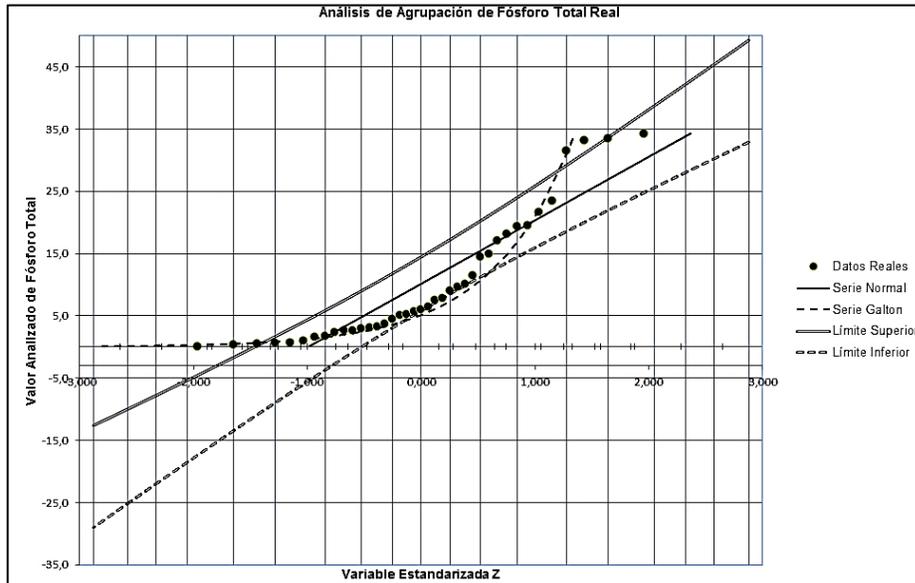


Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.1.2. **Análisis de 39 datos de fósforo total**

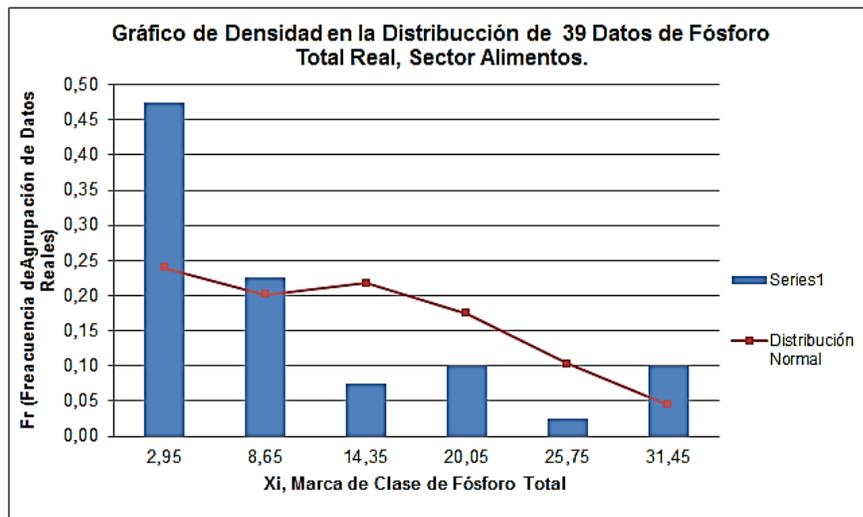
El análisis gráfico del fósforo total demuestra que existen errores para un valor de 95% de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,828850174) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 6. Gráfica de papel probabilístico de fósforo total



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 7. Gráfica de distribución normal de fósforo total

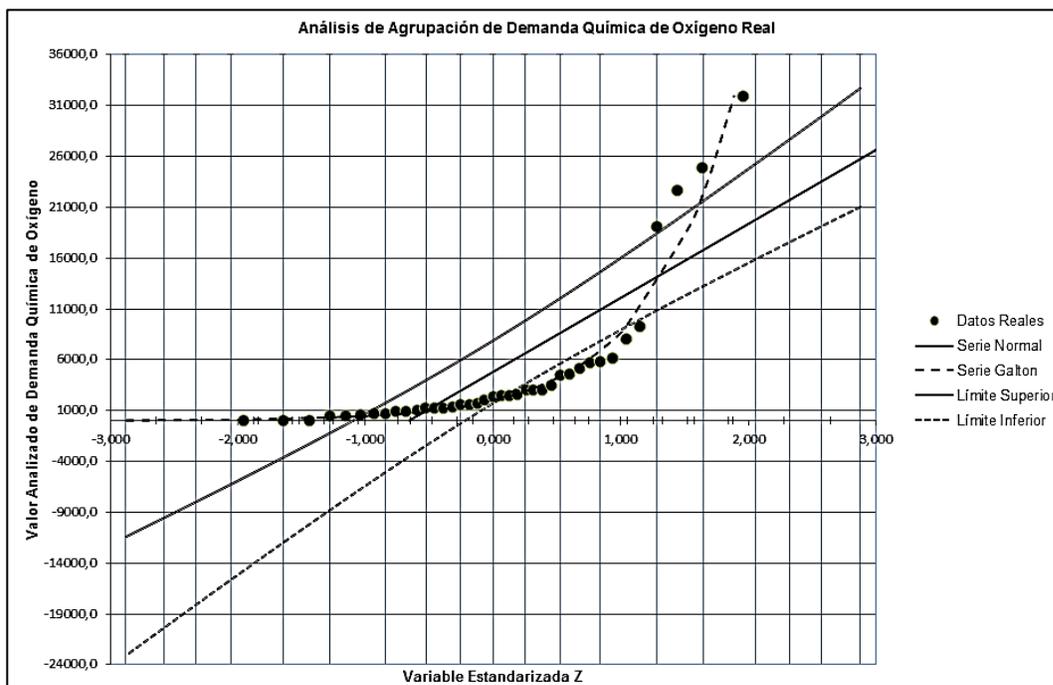


Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.1.3. Análisis de 39 datos de demanda química de oxígeno

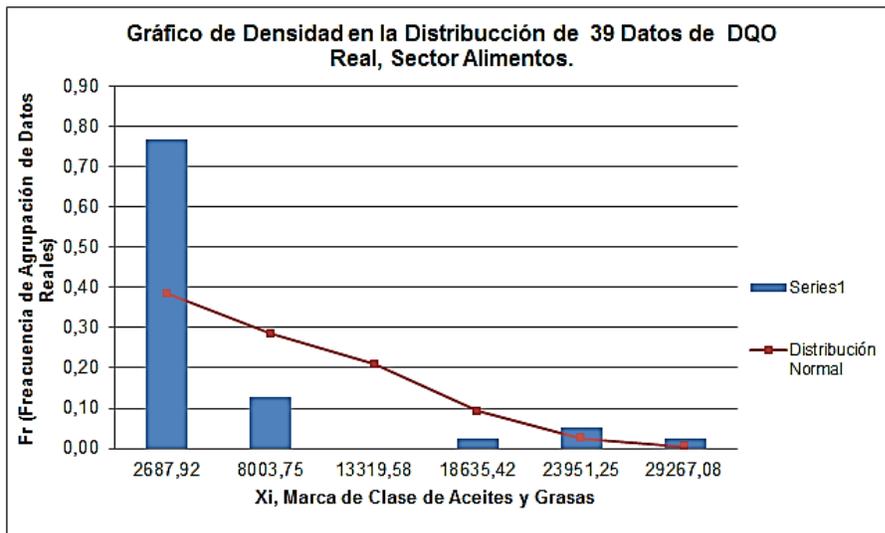
El análisis gráfico del demanda química de oxígeno demuestra que existen errores para un valor de 95 % de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,001730783) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 8. Gráfica de papel probabilístico de demanda química de oxígeno



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 9. **Gráfica de distribución normal de demanda química de oxígeno**

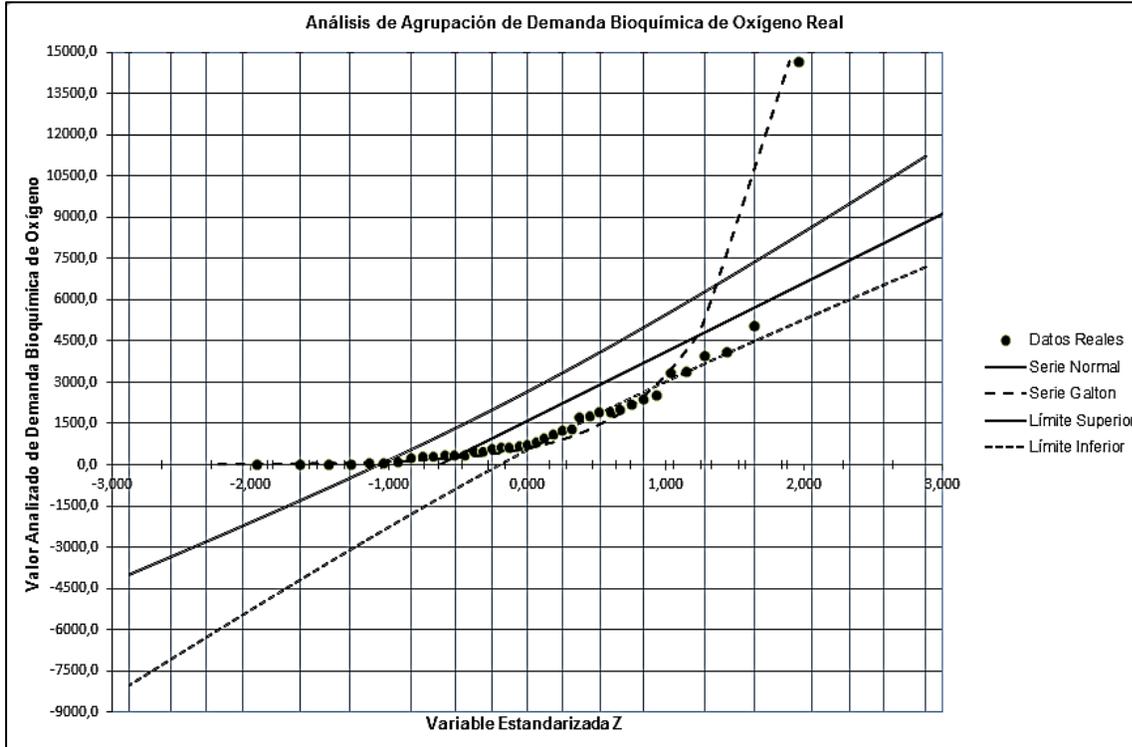


Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.1.4. **Análisis de 39 datos de demanda bioquímica de oxígeno**

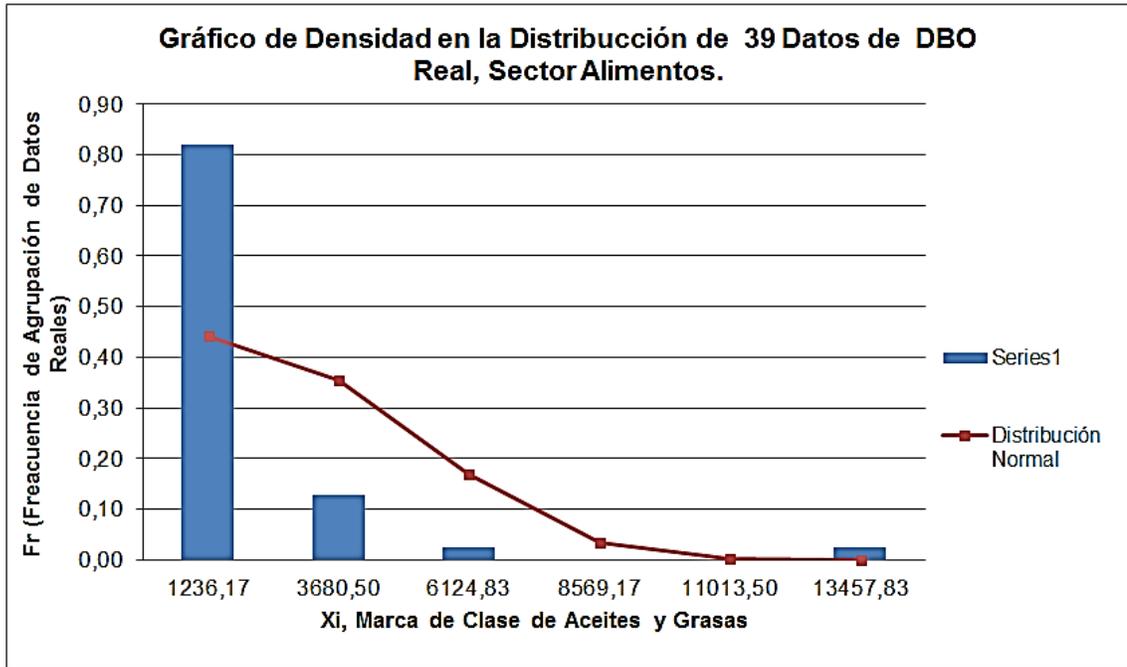
El análisis gráfico del demanda bioquímica de oxígeno demuestra que existen errores para un valor de 95 % de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,032319087) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 10. Gráfica de papel probabilístico de demanda bioquímica de oxígeno



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 11. **Gráfica de distribución normal de demanda bioquímica de oxígeno**

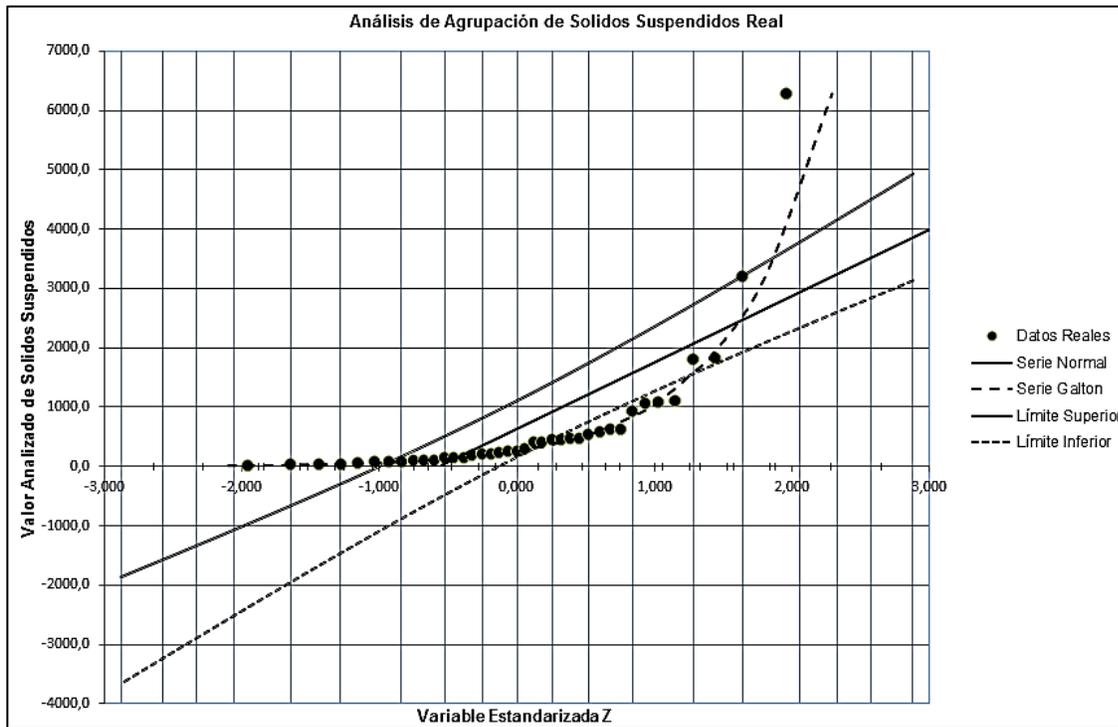


Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.1.5. Análisis de 39 datos de sólidos suspendidos

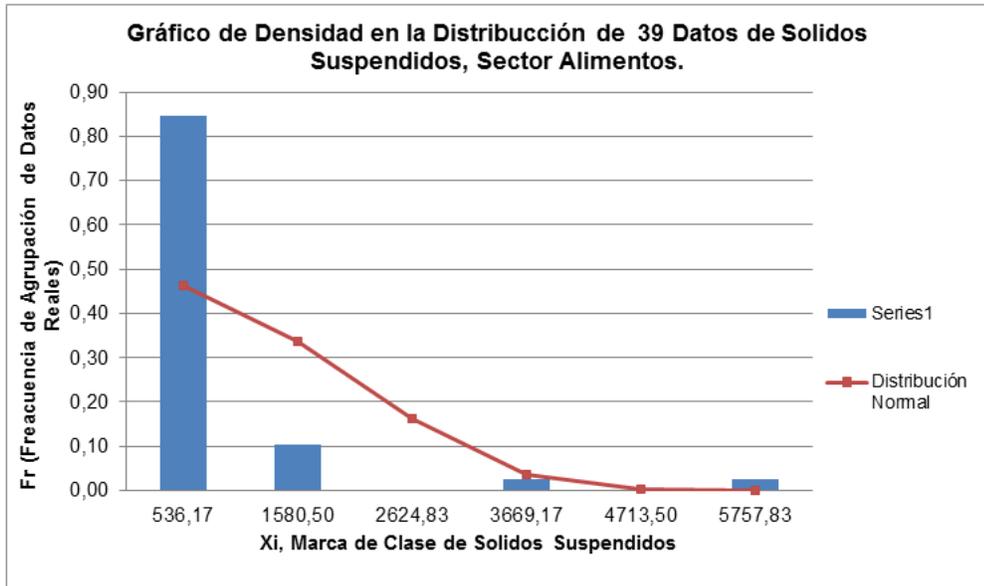
El análisis gráfico del sólidos suspendidos demuestra que existen errores para un valor de 95 % de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,041250181) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 12. Gráfica de papel probabilístico de sólidos suspendidos



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 13. **Gráfica de distribución normal de sólidos suspendidos**

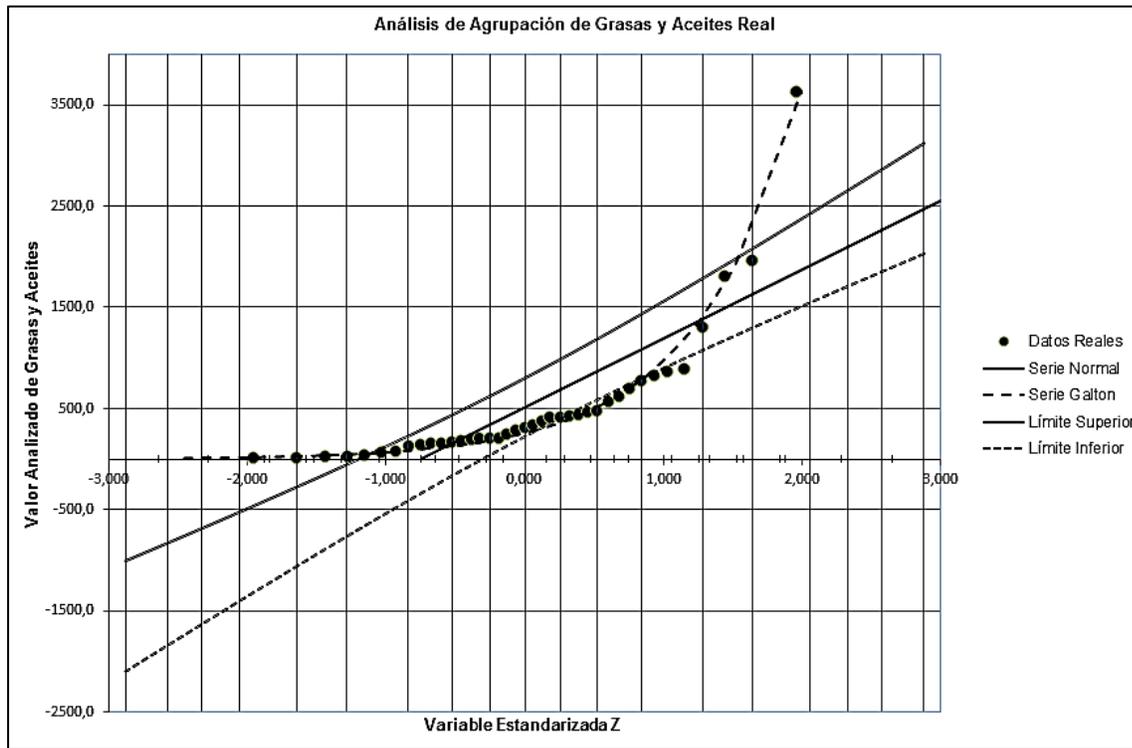


Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.1.6. **Análisis de 39 datos de aceites y grasas**

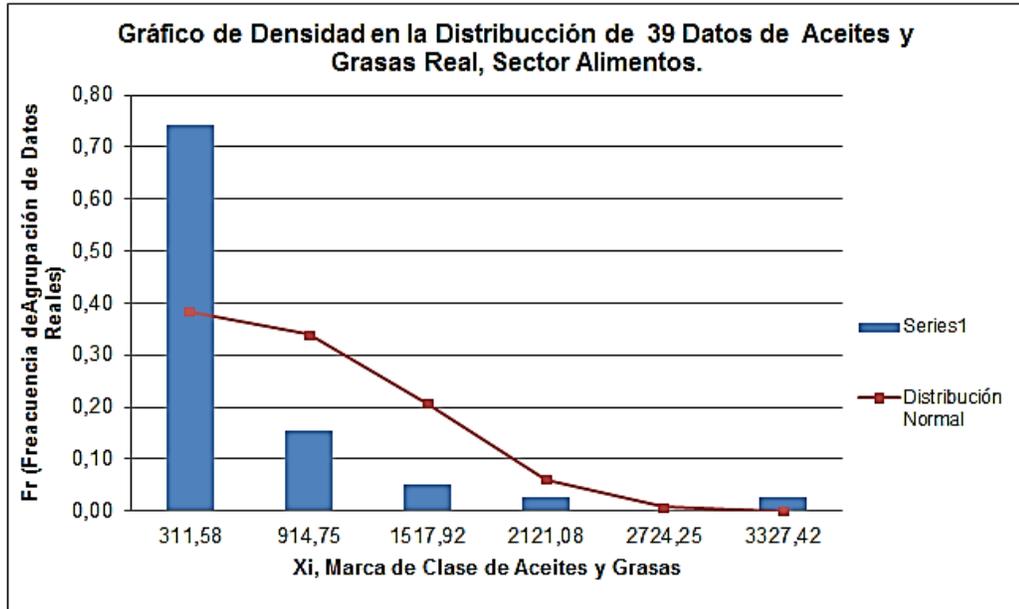
El análisis gráfico del aceites y grasas demuestra que existen errores para un valor de 95 % de error, ya que la serie en distribución normal y en papel probabilístico no corresponde adecuadamente con lo esperado, pese a ello, se demuestra que existe homogeneidad de serie por cumplir con valor de t real (0,072097165) menor a t teórico (2,02269092), permitiendo considerar aceptables los errores y concluir agrupación con error de serie normal.

Figura 14. Gráfica de papel probabilístico de aceites y grasas



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

Figura 15. **Gráfica de distribución normal de aceites y grasas**



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.2. Relación de los parámetros SS, A&G y DBO con DQO

Para este análisis fueron considerados los análisis descritos en el inciso 3.7.3, demostrados por los datos de las tablas XXII, XXII y XXIV al considerar 39 mediciones del sector alimentos. A partir de estos valores se generó el modelo estadístico de correlación de múltiple variable que representa la variación de demanda química de oxígeno (DQO) en relación con la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (S.S.) y aceites y grasas (A&G), a partir del modelo general: $Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+B_3X_3$, valores descritos en la tabla XXII.

$$DQO = -2551,625 + 4,859(DBO) + 0,291(S.S.) - 1,206(A\&G)$$

4.2.1. Comprobación de hipótesis

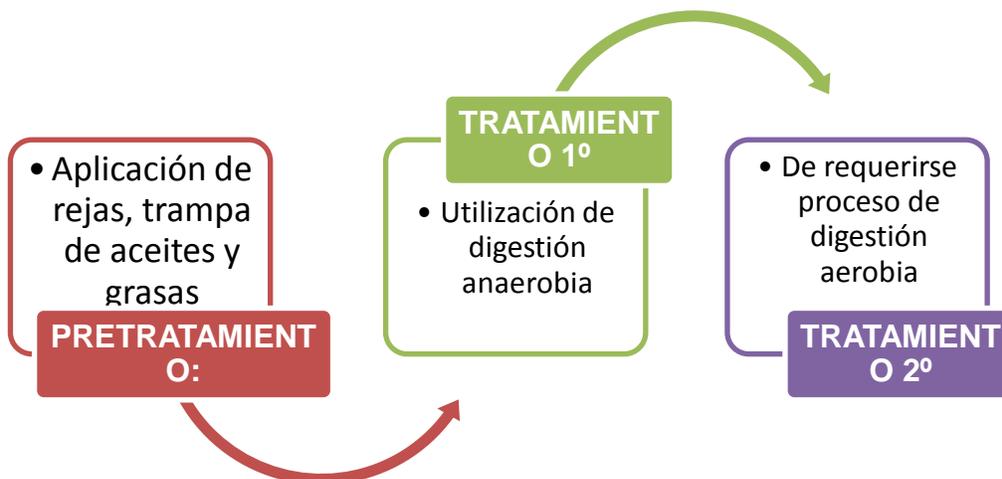
Para la comprobación de hipótesis se utilizan los criterios siguientes:

Ho: coeficiente de determinación (R^2) =0 contra Ha: coeficiente de determinación (R^2) \neq 0; además el valor F de regresión real (F_e) debe ser mayor al valor F de regresión teórica (F_t).

En la tabla XXII se demuestra que el coeficiente de determinación R^2 posee valor distinto de cero, ya que es 0,905, y que F de regresión real posee valor de 111,5665783, siendo este mayor al teórico de 5,086497586, por lo tanto, se acepta Ha.

Ha = existe una correlación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos, es posible implementar un tratamiento primario o secundario para estos.

Figura 16. **Propuesta del sistema de tratamiento**



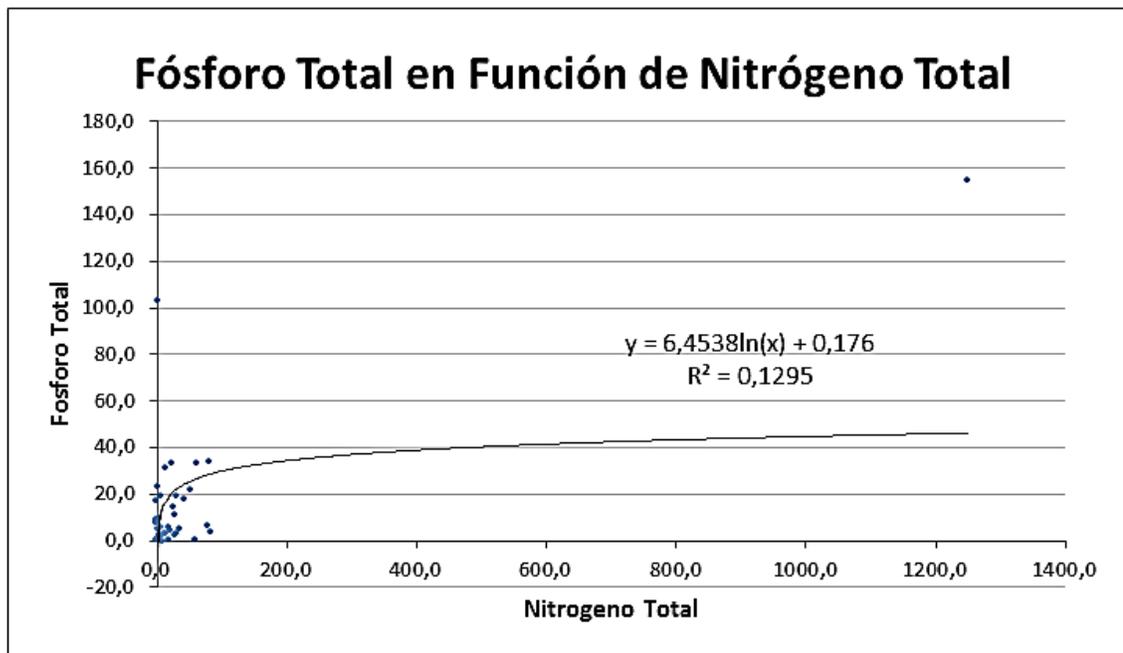
Fuente: elaboración propia.

4.3. Correlación del nitrógeno y fósforo total

4.3.1. Modelo de correlación nitrógeno y fósforo total

$$P = 6,4538 \cdot \ln(N) + 0,176 \quad \text{Donde: } P = \text{fosforo total y } N = \text{nitrógeno total}$$

Figura 17. Gráfica de correlación de fósforo y nitrógeno total



Fuente: datos obtenidos por estadística descriptiva a partir de las temperaturas reales de industrias del sector de alimentos.

4.3.2. Comprobación de hipótesis

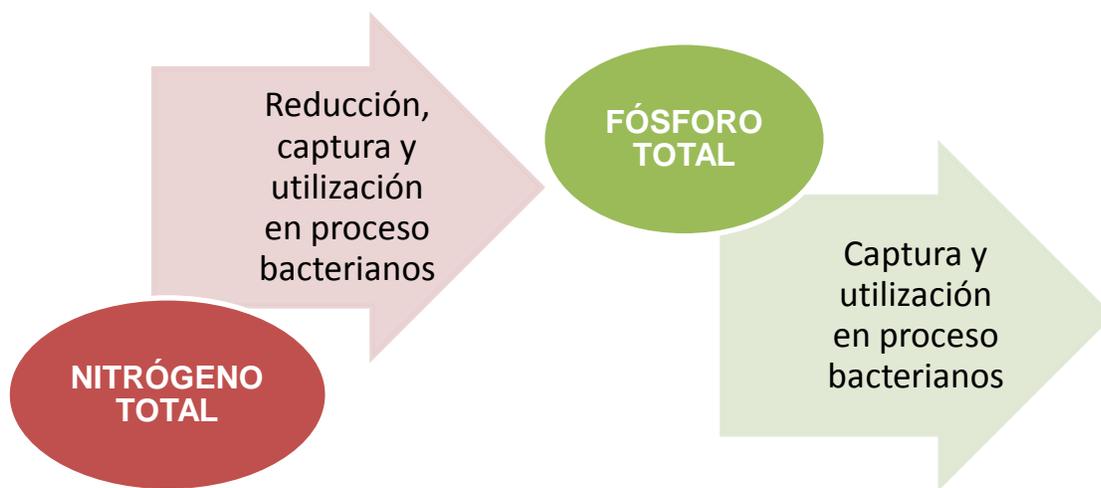
Para la comprobación de hipótesis se utilizan los criterios siguientes:

Ho: coeficiente de determinación (R^2) =0 contra Ha: coeficiente de determinación (R^2) \neq 0; además el valor de probabilidad real (t estimado) debe ser mayor al valor de probabilidad teórica (Ft).

En la figura 17 y tablas XVIII, XIX, XX Y XXI se demuestra que el coeficiente de determinación R^2 posee valor distinto de cero, ya que es 0,1295, y que la probabilidad t real posee valor de 2,34612614 siendo este mayor al teórico de 2,02619246 por lo tanto se acepta Ha.

Ha = existe una correlación directa entre el nitrógeno y el fósforo total, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos; es posible implementar un tratamiento terciario para estos.

Figura 18. **Propuesta del unidad de tratamiento**

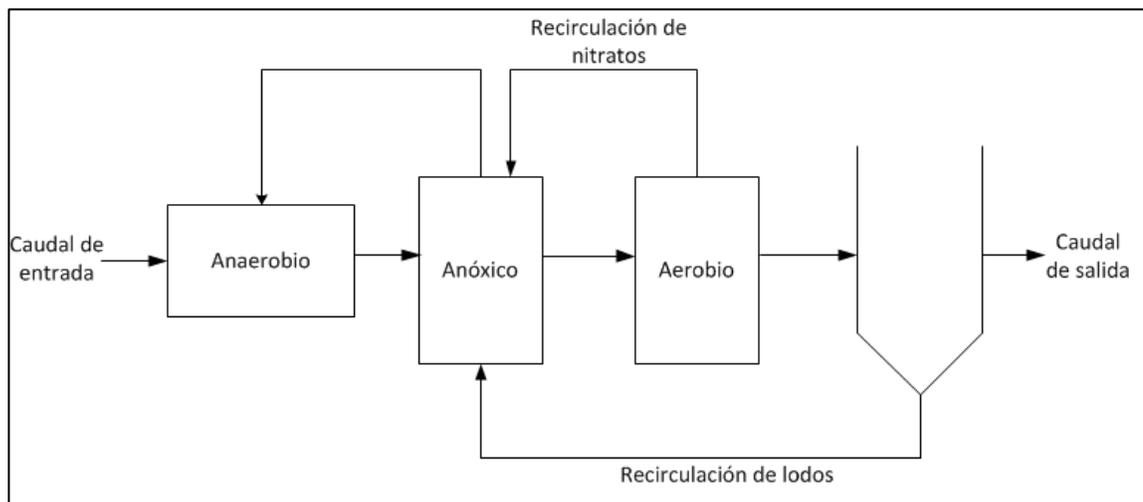


Fuente: elaboración propia.

4.4. Metodología de tratamiento básico

Al ser considerados los resultados previos es posible determinar que existe homogeneidad de datos, principalmente en la temperatura, la cual le corresponde ser el parámetro prioritario para el crecimiento adecuado de bacterias. Al haber determinado correctamente correlación entre ambos nutrientes y la existencia de los recursos necesarios de DBO, S.S., G&A y DQO, es posible determinar la metodología básica para la remoción de contaminantes y el cumplimiento de la regulación nacional vigente, utilizando el esquema siguiente:

Figura 19. **Esquema UTC (*University of Cape Town*)**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los valores obtenidos por medio de la documentación existente en el MARN es posible analizar el resultado de 39 industrias. Para ello se ha elaborado la tabla I. Esta serie de datos fue transformada mediante logaritmos; esta conversión de datos es para mejorar el análisis y comprensión de la información. Para ello es posible determinar que estos datos se comportan como una serie normal, con lo que es posible operar los datos de manera generalizada, basada en esta similitud de valores validada por la media, moda y mediana, como características de una serie normal, con esto se confirma que se pueden operar los datos de manera general entre todas las industrias estudiadas.

Pese a los errores gráficos demostrados en el inciso 4.1. *Determinación de la agrupación de los parámetros representativos del sector de alimentos*, es posible determinar, utilizando la prueba de series de t de Student, que las series son homogéneas, por lo que se procede a realizar los análisis respectivos, pese a que gráficamente no fue posible alcanzar la normalización de las series.

Al disminuir la dispersión de los valores de las series de datos de cada parámetro, se homogenizan los valores obtenidos por estudios y análisis previos registrados en el MARN (ver tabla VIII y IX), asimismo al reducir el coeficiente de variación en cada serie, se evidencia que se redujo el nivel de dispersión de los datos, permitiendo sistematizar la información de cada proceso. En cada valor de sesgo es posible deducir que la forma de su gráfica es ligeramente inclinada o sesgada hacia la izquierda, y del valor obtenido para su curtosis, se deduce una curva ligeramente achatada o

platicurtica, con lo anterior se discute la uniformidad de los datos y que correctamente son agrupables los datos por utilizar.

Al analizar las series estandarizadas se comprueba lo descrito previamente, al obtener su media = 0 y su desviación estándar =1. Por lo que las tablas III, IV, V, VI y VII permiten aseverar nuevamente que es posible la agrupación de estos datos y generalizar los resultados.

Para la comprobación de hipótesis referente a la correlación de nitrógeno total con el fósforo total la Tabla IX, muestra una serie de mediciones de contenido de nitrógeno y fosforo en aguas residuales, a partir de las cuales se proyecta una relación entre la variación de fosforo, en función del nitrógeno, utilizando un modelo de la forma $P = 6.4538 \cdot \ln(N) + 0.176$, donde P=fósforo total y N= nitrógeno total contenidos en las aguas residuales medidas. Con esta ecuación y los bajos errores captados en los análisis previos se desarrolla la capacidad de predecir concentraciones tendenciales de fósforo total en función del nitrógeno total.

Este modelo fue tomado a partir de las aproximaciones que Excel hace de acuerdo con las series de datos, y validado la utilización de hipótesis a partir de los cálculos de los parámetros de correlación r y r^2 , Las bases para la aprobación de las hipótesis son $H_0 =$ hipótesis nula, si $r = 0$ y $H_a =$ Hipótesis alternativa si $r \neq 0$, como se describen en resultados:

$H_0 =$ no existe correlación directa entre el nitrógeno y el fósforo total, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos, no es posible implementar un tratamiento terciario para estos.

Ha = existe una correlación directa entre el nitrógeno y el fósforo total, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos, es posible implementar un tratamiento terciario para estos.

Considerando lo estipulado en Figura 17; Tabla IX; Tabla X y se demuestra que el coeficiente de determinación R^2 posee valor distinto de cero, ya que es 0,1295, y que la probabilidad t real posee valor de 2,34612614 siendo este mayor al teórico de 2,02619246. Por lo tanto, se acepta Ha, confirmando que existe una correlación entre el nitrógeno y el fósforo total. Este tipo de proceso de comprobación de hipótesis es posible emplearlo únicamente para dos series de datos correlacionadas, por lo que para la comprobación de la segunda hipótesis es necesaria la utilización de otro sistema de verificación.

Observando lo indicado en la Figura 17, los errores no se encuentran fuera del límite establecido de error, lo que valida el modelo y se calcula el coeficiente de correlación "r", donde se establecen el límite superior e inferior para la gráfica del correlograma, con sus intervalos de confianza del 95 %.

Para el análisis de la segunda hipótesis se consideraron tablas de mediciones de valores de DQO, DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, para un análisis de aguas residuales, considerando 39 mediciones. A partir de estos valores se considera el modelo que representa la variación de DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, partiendo del modelo general de la ecuación general: $Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+B_3X_3$.

Posterior al análisis estadístico fue posible determinar que la relación matemática idónea era el sistema $DQO= -2551,625+4,859(DBO_5)+0,291(S. \text{ suspendidos})-1,206 (\text{aceites y grasas})$, Al hacer un análisis del error de la relación determinada (ver Tabla XII y se confirma que el modelo seleccionado

es adecuado y no existen datos dudosos o ergóticos, que queden fuera de los intervalos de confianza seleccionados del 95 %.

Para la correlación buscada para la comprobación de las hipótesis fue requerido el análisis del inverso de la distribución de probabilidad F, en base al agrupamiento de la serie de datos analizados. La distribución F fue usada en una prueba F que compare el grado de variabilidad en el conjunto de datos para la determinación de un grado de diversidad similar. Considerando las hipótesis:

Ho = no existe correlación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos, no es posible implementar un tratamiento primario y/o secundario para estos.

Ha = existe una correlación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, contenido en las aguas residuales de industrias de alimentos, es posible implementar un tratamiento primario y/o secundario para estos.

Los grados de libertad analizados por medio del programa Microsoft Excel permitieron el estudio de estas variables en conjunto logrando alcanzar los requerimientos necesarios para comprobar las hipótesis mediante los métodos previamente descritos, completando las condiciones necesarias para la prueba F en donde el F estimado fue mayor al F teórico calculado con microsoft excel ($F_e > F_t$ donde $111,567 > 5,086497586$). Por lo anterior, es aceptada la alternativa Ha, definiendo por este método que existe una relación directa entre el DQO en relación con DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas.

Considerando la información anterior, es posible determinar el proceso metodológico del tratamiento de las aguas residuales del sector analizado. Esto se determina al utilizar los conocimientos generados por el procesamiento de datos previos, indicando que el mejor método en relación costo, beneficio y área para disponer el tratamiento, es el uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales generadas en el sector sujeto de análisis, según Ferrer, et al 2013.

Como se determina en la Figura 19 el uso mixto de unidades aerobias, anaerobias y anóxicas permitirá primeramente la reducción de la DQO, con lo cual se removerá directamente la DBO, sólidos en suspensión y aceites y grasas, como ha sido determinado (los porcentajes de reducción estarán sujetos al tipo de microorganismo empleado). De manera secundaria y como se ha determinado a lo largo del estudio, considerando las correlaciones y homogeneidad de datos, es posible la eliminación por nitrificación y posterior desnitrificación para la remoción del nitrógeno total utilizando la combinación de los procesos anóxico y aerobio, alcanzando la eliminación del nitrógeno en forma gaseosa. Aunado a ello, se requiere el empleo de unidades anaerobias y aerobias generando el encapsulamiento en los fangos activados del fósforo. De este sistema descrito surge el requerimiento de la unión descrita en la Figura 19, en el cual el sistema aerobio y anóxico eliminará el nitrógeno, el caudal resultante se aplicará a la unidad aerobia, permitiendo el encapsulamiento en los fangos del fósforo.

Los conocimientos alcanzados permiten comprender que el empleo de un tanque homogeneizador regulará la temperatura de ingreso al sistema de tratamiento, la utilización de un biodigestor sencillo se enfocará en la disminución principalmente de S.S., A&G y DBO. Ello permitirá la disminución de la DQO. Por último, al utilizar un sistema de laguna biológica que contiene

los procesos anóxicos y aeróbicos es posible la reducción de nutrientes (fósforo y nitrógeno total), así es posible alcanzar el cumplimiento del Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos (Acuerdo Gubernativo 236-2006).

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la serie de datos estadísticos basados en 39 industrias de alimentos diversos, eran homogéneas, (utilizando el análisis t de Student) y heterogéneas (por prueba de desfase de Cramer) por lo que fue posible comprobar su agrupación a nivel general, pese a no alcanzar en algunos casos la normalización de las series, a excepción de la serie de temperatura.
2. Se desarrolló un análisis estadístico para comprobar las hipótesis, validar tendencias, agrupaciones adecuadas de datos y manejo de datos para su interpretación, por lo que es posible confirmar que existe relación entre el nitrógeno y fósforo total, al utilizar el modelo siguiente: $P = 6,4538 * \ln(N) + 0,176$, donde P=fósforo total y N= nitrógeno total.
3. La prueba de correlación realizada para el análisis DQO, DBO, S.S. y A&G permitió establecer la correcta correlación, esta es $DQO = -2551,625 + 4,859(DBO5) + 0,291(S. \text{ Suspendidos}) - 1,206(\text{aceites y grasas})$, por lo que se acepta H_a y se procede a determinar con mayor certeza la propuesta del sistema generalizado de tratamiento de aguas residuales para el sector de alimentos.
4. Se propuso un sistema de tratamiento básico de las aguas residuales en general, la propuesta según los datos, han permitido conocer que la temperatura de estas aguas puede ser manejadas por un único pretratamiento, tanque de homogenización. El enfoque en la disminución principalmente de S.S., A&G y DBO permitirá la disminución de la DQO

utilizando un biodigestor; empleando un sistema de laguna biológico es posible la reducción de nutrientes.

RECOMENDACIONES

1. Es de importancia continuar con los estudios, ya que se ha determinado que es posible la propuesta de un tratamiento terciario general para este sector industrial, aunque queda sujeta a análisis experimental la propuesta específica.
2. Se debe realizar análisis considerando caudales, por lo que el seguimiento a esta investigación es importante.
3. Se debe continuar estos análisis estadísticos con los demás sectores productivos para lograr y alcanzar una mayor uniformidad en los tratamientos de aguas residuales.
4. Continuar con el análisis realizado en el presente documento, para otros sectores industriales como lo es el hospedaje; prestación de servicios, agricultura y ganadería, entre otros.

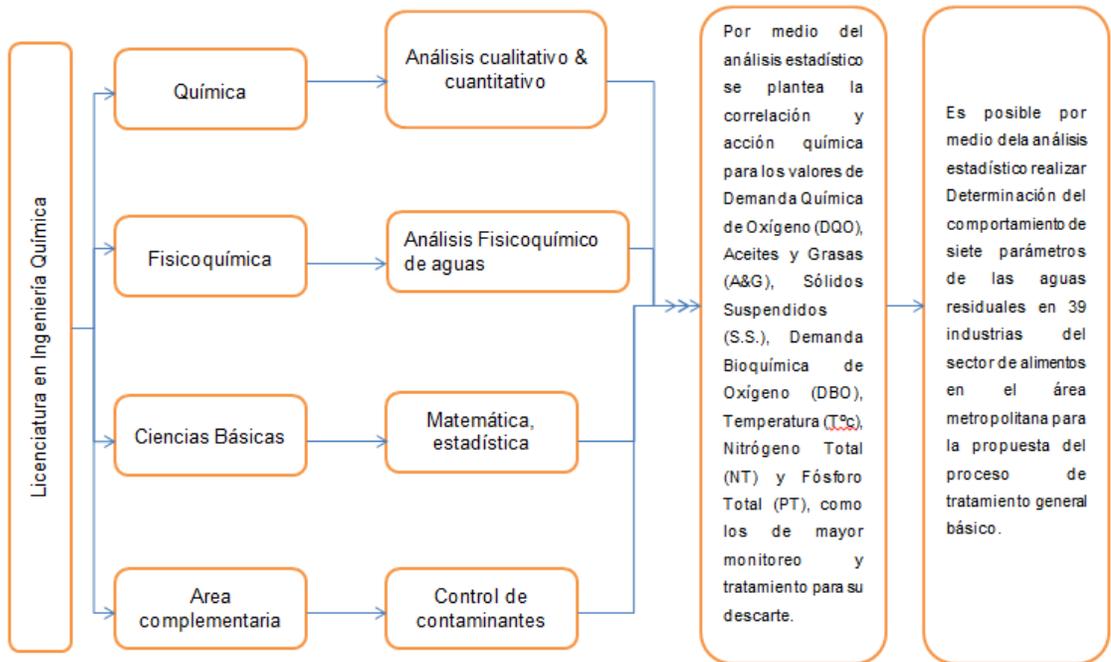
BIBLIOGRAFÍA

1. AZNAR, Antonio. *Determinación de los parámetros físico-químicos de calidad de las aguas*. España: Instituto tecnológico de Química y Materiales Álvaro Alonso Barba, 2000. 288 p.
2. CAMBRANES MORALES, Erick Martín. *Instalación y control de una planta de tratamiento físico-químico de aguas residuales con base en las regulaciones ambientales de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010. 308 p.
3. FERRER POLO, José; *et al.* *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. México: Alfaomega Grupo S. A., 2013. 487 p.
4. FAIR, Gordon; *et al.* *Ingeniería sanitaria y de aguas residuales (purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales)*. México: Grupo Noriega Editores, 2008. 456 p.
5. KEMMER, Frank N. y MCCALLION, John. *Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones*. México: McGraw-Hill, 1990. 245 p.
6. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo Gubernativo 236-2006: *Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Guatemala, 15 de mayo de 2006.

7. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Acuerdo Gubernativo 431-2007: *Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental*. Guatemala, 05 de octubre de 2007.
8. RAMÍREZ Lorenzana, PÁVEL, Ednar y SALAZAR, Ruth María Eugenia. *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas de una industria farmacéutica nacional, según el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos y propuesta para el aprovechamiento de desechos*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 298 p.
9. SOLSONA, Felipe. *Guías para elaborar normas de calidad del agua de bebida en los países en desarrollo*. Perú: OPS/CEPIS/OMS, 2002. 215 p.

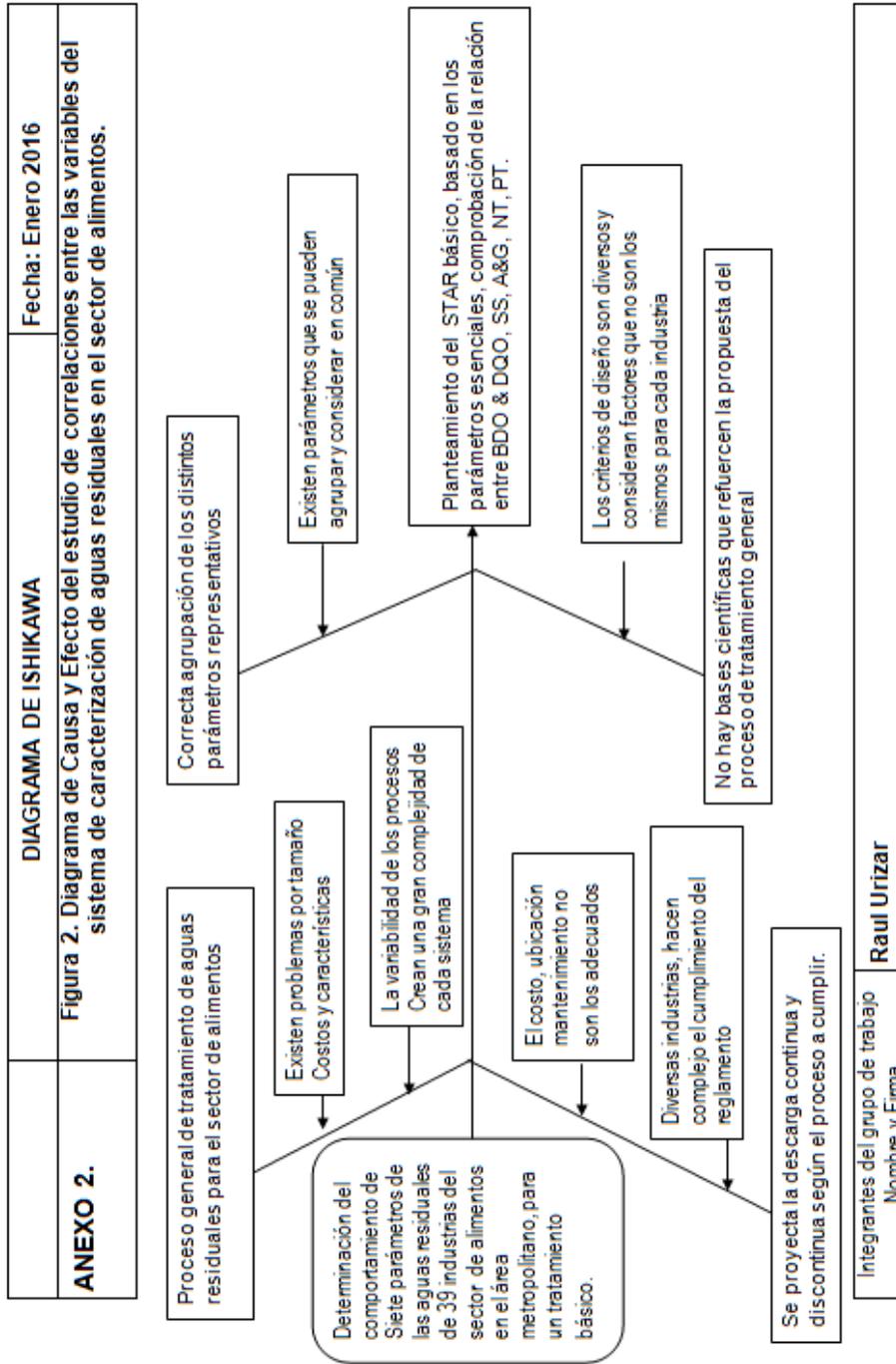
APÉNDICES

Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Cronograma**

ACTIVIDAD	Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Elaboración de protocolo	■	■	■	■																
Visita a industrias, obtención de datos y muestras de AR					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Tabulación y ordenamiento de resultados															■					
Obtención de tendencias y discusión con personal de MARN																■				
Generación de resultados																	■			
Discusión del proceso propuesto																		■		
Conclusiones finales																			■	
Período de correcciones																			■	■
Presentación y aprobación final																				■

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Costos de recursos utilizados**

Descripción	Subtotales (Q)
Visitas al MARN	Q 1 375,00
Equipo de computo	Q 7 830,00
Varios	Q 1 768,75
Costo estimado de recurso humano del MARN	Q 3 255,00
Total	Q 14 228,75

Fuente: elaboración propia.