

Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”

Facultad de Ciencias Técnicas

Departamento de Química e Ingeniería Química



Trabajo de diploma presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico.

*Empleo de microorganismos eficientes en el
proceso de sedimentación secundaria en la
Planta de Tratamiento para aguas residuales
“Las Conchas”, Varadero.*

Autora: Yarasay Martínez Hernández

Tutoras: MSc. Mariela Almeida Rodríguez.

DrC. Lourdes Y González Sáez.

Matanzas, 2019.

Nota de aceptación

Nombres y Apellidos

Firma

Nombres y Apellidos

Firma

Nombres y Apellidos

Firma

Declaración de autoridad

Yo Yarasay Martínez Hernández declaro que soy la única autora de este trabajo y según las facultades que se me han conferido autorizo sea objeto de consulta para todo aquel que lo desee, negándose el permiso para la reproducción total o parcial del mismo.

Firma

Dedicatoria

A la memoria de mi abuela materna por su dedicación, apoyo y amor incondicional.

A mi querida madre por ser mi sostén, mi guía y por ser una luchadora incansable.

Agradecimientos

A mis tutoras por todo el interés, apoyo y gran labor como profesoras.

A Damarys y Daililys por la buena acogida y la ayuda brindada.

A mi madre por estar siempre presente y ser incondicional.

A toda mi familia en especial a mi tía Ana Mery por su ayuda y preocupación.

A mi compañero en la vida Osiel, por estar a mi lado sin importar las circunstancias y por quererme tanto.

A mis suegros Gladis y Fabián por su apoyo y preocupación.

Resumen

El presente trabajo se realiza sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados "Las Conchas", ubicada en la Península de Hicacos (Varadero). Se determina la composición físico-química y microbiológica de estas aguas a la salida del reactor aerobio y en la etapa de sedimentación secundaria con el uso de microorganismos eficientes (EM), para esta última se realiza una simulación a escala de laboratorio mediante un diseño experimental compuesto central donde se utilizan como variables, dosis de microorganismos eficientes y tiempo de retención hidráulica. Los resultados se optimizan mediante una función multiobjetivo con el uso del programa estadístico *STATGRAPHIC PLUS 5.3* y *Microsoft Excel 2010* los cuales reportaron que los valores óptimos para las variables analizadas en la etapa de sedimentación secundaria son de 3 horas para el tiempo de retención hidráulica y una dosis de EM de 0,3 mL/L. Se propone una modificación tecnológica para la inserción de EM en la etapa de decantación secundaria que consta de un tanque de acero inoxidable, una bomba de tipo ITUR con diámetro del impelente de 139 mm para un flujo de EM de 5 m³/d y 10 m de tuberías de acero inoxidable. Los resultados económicos de la propuesta tecnológica arrojaron un valor de costo de inversión igual a 339562,65 pesos cubanos.

Abstract

The present work was made about the system of wastewater treatment "Las Conchas" situated in Hicacos peninsula (Varadero). Where determinate the physical-chemical and microbiological composition of these waters to its leave of the aerobic reactor in the fase of secondary sedimentation with the use of efficient microorganisms corresponding to the bioproduct IH-plus, for this last fase realize it a simulation to scale of laboratory by means of experimental central design where is used as variables: dose of EM and time of hidraulic retention. The results be rich with the use of the program STATGRAPHIC plus 5.3 who reported that values analyzed in the fase of secondary sedimentation are from 3 hours for the time of hidraulic retention and a dose of EM of 0,3 mL/L. Proposing a technological modification for insertions of EM in the fase of secondary sedimentation that be composed one steel stainless tank, one pumps ITUR with Ø of 139 mm for a flow of EM of 5 m³/d and 10 m stainless steel pipes. The economic results of this technological proposal throwed a valued cost of inversion similar to 339562,65 national coin.

Índice	Pág.
Introducción	1
Capítulo 1 Análisis Bibliográfico	4
1.1 Aguas residuales. Clasificación y composición	4
1.2 Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales	6
1.3 Indicadores de contaminación de las aguas residuales	8
1.4 Tratamiento de las aguas residuales	10
1.4.1 Tratamiento preliminar	11
1.4.2 Tratamiento primario	12
1.4.3 Tratamiento secundario	13
1.4.3.1 Sedimentación secundaria	19
1.4.4 Tratamiento terciario	20
1.5 Características, composición, tratamiento y gestión de lodos residuales	20
1.6 Microorganismos eficientes (EM)	23
1.6.1 Microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales (lodos activados)	24
1.6.2 Usos de los Microorganismos eficientes	26
1.7 Conclusiones parciales del capítulo	29
Capítulo 2 Materiales y Métodos	31
2.1 Descripción de la zona de estudio. Península de Hicacos (Varadero)	32
2.2 Descripción del proceso tecnológico de la PTR “Las Conchas”	33
2.3 Análisis físico-químico y microbiológico de las aguas residuales procedentes del tanque de aireación perteneciente al sistema por lodos activados “Las Conchas”	38
2.3.1 Determinación analítica	39
2.4 Características de los microorganismos eficientes empleados en la investigación	40
2.5 Evaluación del empleo de microorganismos eficientes en las aguas residuales procedentes de la planta en estudio en la etapa de sedimentación secundaria	41

2.5.1 Diseño y montaje de experimentos	41
2.5.2 Determinación de los sólidos sedimentables y lodos generados	42
2.5.3 Determinación de la eficiencia de remoción	43
2.5.4 Procesamiento estadístico	43
2.6 Propuesta de modificación tecnológica	44
2.7 Costo de inversión de la modificación tecnológica	48
2.8 Conclusiones parciales del capítulo	49
Capítulo 3 Análisis de los resultados	51
3.1 Análisis físico-químico y microbiológico de las aguas residuales procedentes del tanque de aireación perteneciente al sistema por lodos activados “Las Conchas”	51
3.2 Características de los microorganismos eficientes empleados en la investigación	54
3.3 Evaluación del empleo de microorganismos eficientes en las aguas residuales procedentes de la planta en estudio en la etapa de sedimentación secundaria	54
3.3.1 Determinación de los sólidos sedimentables y lodos generados	62
3.3.2 Determinación de la eficiencia de remoción	67
3.3.3 Procesamiento estadístico	68
3.4 Propuesta de modificación tecnológica	72
3.5 Costo de inversión de la modificación tecnológica	73
Conclusiones	75
Recomendaciones	76
Bibliografía	77
Anexos	83

Introducción

La contaminación ambiental es una de las situaciones más problemáticas que enfrenta la humanidad en la actualidad y no es secreto que dichos problemas son ocasionados por la propia acción indiscriminada del hombre, la naturaleza sin fronteras de la atmósfera y los océanos ha dado como resultado que los problemas por contaminación sean de talla mundial. Como consecuencia del crecimiento poblacional se ha incrementado el consumo de productos y usos de servicios que generan una gran variedad de desecho sólidos y líquidos con disímiles características, que son vertidos deliberadamente al medio. Su influencia negativa ha traído como consecuencia daños progresivos en el medio natural, dígase contaminación del suelo, el aire y el agua.

Debido a la importancia que representan las zonas costeras para la actividad humana, se han determinado que una de las principales causas de deterioro este valioso hábitat es la contaminación debido a, los vertimientos de aguas residuales sin previo tratamiento o con tratamientos insuficientes.

Actualmente existen diversas normas y políticas que se encargan de asegurar que los impactos de las descargas del agua residual a cuerpos de agua receptor sean aceptables. Dichas normas consisten fundamentalmente en establecer límites de calidad y cantidad de efluentes y conceder permisos de vertidos de acuerdo con estos. Los límites establecidos se fundamentan en estudios de los posibles impactos ambientales, con el objetivo de obtener una óptima calidad de sus aguas.

Cuba cuenta con uno de los destinos turísticos más visitados en el mundo ubicado en la Península de Hicacos en Varadero, que es además una de las mayores fuentes económicas de ingreso al país. Existen diversos estudios en esta zona como los aportados por Martínez, (2005) que demuestran la importancia del tratamiento de las aguas residuales para el vertimiento, específicamente hacia la Bahía de Cárdenas, con este propósito la península cuenta con varias Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.

El objetivo del tratamiento de aguas residuales consiste en la eliminación de compuestos contaminantes presentes en el agua, mediante una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. En los últimos años para mejorar el

funcionamiento de dichos procesos, se ha trabajado en la inclusión de microorganismos eficientes y así hacerlos más efectivos. Aunque es cierto que esta práctica sea reciente es válido destacar que ha mostrado resultados positivos como se evidencian por autores como Bejerano y Escobar, (2015) y Beltrán y Campos, (2016) donde demuestran que estos incrementan las densidades de microorganismos, que pueden utilizar los compuestos presentes en el agua como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento, con la consecuente reducción de sus concentraciones.

Al emplear una mezcla de varios microorganismos, con características metabólicas diferentes y complementarias entre sí, la cantidad y variedad de los compuestos que pueden ser degradados será mayor y los procesos a su vez, serán más eficaces (Cardona y García, 2008).

El polo turístico de Varadero cuenta actualmente con seis sistemas de tratamientos de residuales líquidos instalados, para procesar las aguas albañales provenientes de las instalaciones ubicadas en esta zona.

La planta de tratamiento de residuales “Las Conchas”, puesta en marcha recientemente (2015), resulta ser un sistema convencional de lodos activados que trata los residuales provenientes de hoteles de nueva construcción en dicha zona turística. A pesar de poseer un funcionamiento acorde a las especificaciones para su funcionamiento, la disposición de la carga microbiana hacia el cuerpo receptor (Costa Sur de la Península de Hicacos) resulta aún elevada, por lo que resulta ser contaminante. Para dar solución a esta situación polémica y de acuerdo a lo planteado con anterioridad se plantea como **problema científico** de la presente investigación:

¿Cómo mejorar la eficiencia de remoción nutricional y microbiológica en la etapa de sedimentación secundaria del tratamiento de aguas residuales por lodos activados “Las Conchas” para su disposición final?

Hipótesis: Si se emplea una dosis de microorganismos eficientes en el proceso de sedimentación secundaria, se podrá mejorar la eficiencia de remoción nutricional y microbiológica en el tratamiento de aguas residuales del sistema por lodos activados “Las Conchas”.

Objetivo general: Estudiar el comportamiento de la aplicación de microorganismos eficientes en el proceso de sedimentación secundaria en el tratamiento de aguas residuales por el sistema por lodos activados “Las Conchas”.

Objetivos específicos

- ❖ Valorar a escala de laboratorio el empleo de microorganismos eficientes en la etapa de sedimentación secundaria en el tratamiento de aguas residuales por el sistema por lodos activados “Las Conchas”.
- ❖ Caracterizar los lodos resultantes del empleo de microorganismos eficientes, posterior al procedimiento de secado a escala de laboratorio.
- ❖ Optimizar los factores de estudio (dosis de microorganismos eficientes y Tiempo de Retención Hidráulico) en la etapa de sedimentación secundaria.
- ❖ Realizar una propuesta de modificación tecnológica que incluya el empleo de microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales del sistema por lodos activados “Las Conchas” en la etapa de sedimentación secundaria.
- ❖ Determinar el costo de inversión de la propuesta tecnológica que estipule el empleo de microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales del sistema por lodos activados “Las Conchas”.

Capítulo1 Análisis Bibliográfico

Actualmente uno de los problemas más importantes que se enfrentan a nivel global es sin dudas la contaminación medio ambiental, debido a ello se han desarrollado diferentes métodos en lo que respecta al tratamiento de aguas residuales, con la misión de favorecer a su protección y beneficio. En este primer capítulo se abordarán aspectos importantes como la definición, clasificación, composición y caracterización de las aguas residuales. Además, se conocerán sus indicadores de contaminación, las diferentes etapas de tratamiento y el uso de microorganismos eficientes específicamente en el sistema de tratamientos por lodos activados.

1.1 Aguas residuales. Clasificación y composición

Cuando se habla de aguas residuales, se hace referencia a todo tipo de agua que haya sido afectada de forma negativa por la acción del ser humano. De este modo, quedarían fuera aquellas aguas que, por causas naturales, no sean aptas para el consumo. En este sentido, las aguas residuales son todas aquellas aguas que han sido usadas en los entornos domésticos y urbanos, en las industrias y ganaderías, así como las aguas naturales que, por accidente o mala praxis, se hayan mezclado con las anteriores. De este modo, se encuentra con que las aguas residuales son aquellas que además de agua, también contienen una gran cantidad de elementos contaminantes, ya sean sólidos o disueltos en la misma (Arriols, 2018).

Las aguas residuales son clasificadas generalmente de acuerdo a la fuente de donde proceden, a continuación, se describen una serie de clasificaciones:

Domésticas: son aquellas aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas, dígase, aguas de cocina, lavadoras y procedentes del baño (Rodríguez *et al.*, 2006).

Industriales: son todas aquellas aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial. La contribución de las actividades industriales en la composición de las aguas residuales urbanas depende principalmente del grado de industrialización, de la

aglomeración urbana y de las características de los vertidos realizados a la red de colectores municipales, los cuales pueden tener una composición muy variable en dependencia del tipo de industria (Martín *et al.*, 2006).

Pluviales o de tormenta: son aguas procedentes de las escorrentías pluviales que arrastran partículas y contaminantes presentes tanto en la atmósfera como en los viales. Estas tendrán mayor o menor grado de representatividad en dependencia principalmente del tipo de red de saneamiento existente, así como de la pluviometría registrada (Metcalf y Eddy, 2014).

Agropecuarias: resultan ser aquellas aguas residuales provenientes de las instalaciones agropecuarias como vaquerías, producciones agrícolas, granjas avícolas, centros porcinos (Terry *et al.*, 2006).

Urbanas: no son más que aquellas aguas residuales domésticas o la mezcla de las mismas con aguas residuales industriales y/o aguas de escorrentía pluvial (Martín *et al.*, 2006).

La composición de las aguas residuales es muy variable en razón de los diversos factores que lo afectan. Entre estos se tiene el consumo promedio de agua por habitante y por día que afecta su concentración (cantidad) y los hábitos alimenticios de la población que caracteriza su composición química (calidad).

En general, las aguas residuales contienen aproximadamente un 99,9% de agua y el resto está constituido por materia sólida. Los residuos sólidos están conformados por materia mineral y materia orgánica. La materia mineral proviene de los subproductos desechados durante la vida cotidiana y de la calidad de las aguas de abastecimientos. La materia orgánica proviene exclusivamente de la actividad humana y está compuesta por materia carbonácea, proteínas y grasas.

Las proteínas constituyen del 40 al 50% de la materia orgánica y están representadas por los complejos de amino ácidos y proporcionan la mayor parte de los nutrientes bacterianos. Aproximadamente un 50 - 60% de las proteínas se encuentran disueltas en las aguas residuales y un 20 - 30% en la fracción sedimentable. La materia carbonácea está representada por los

hidratos de carbono y que a su vez están constituidos por los almidones, los azúcares y la celulosa, de esta materia carbonácea, los dos primeros son fácilmente degradables. Los porcentajes de hidratos de carbono que se encuentran en forma disuelta y sedimentable son semejantes a las proteínas. Las grasas incluidas en los ácidos grasos no suelen ser solubles y se degradan más lentamente (Rojas, 2002).

1.2 Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por su composición física, química y biológica. La **Tabla 1.1** muestra las principales propiedades físicas de aguas residuales, así como sus principales constituyentes químicos y biológicos, y su procedencia. Es conveniente observar que muchos de los parámetros que aparecen en la tabla están relacionados entre ellos. Por ejemplo, una propiedad física como la temperatura afecta tanto a la actividad biológica como a la cantidad de gases disueltos en el agua residual (Metcalf y Eddy, 2014).

Tabla 1.1 Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias.

Características	Procedencia
Propiedades físicas:	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, degradación natural de materia orgánica.
Olor	Agua residual en descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministros, agua residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.
Constituyentes químicos:	
<i>Orgánicos:</i>	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales, aceites y grasas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.

Tabla 1.1 (Continuación)

Pesticidas	Residuos agrícolas.
Fenoles	Vertidos industriales.
Proteínas	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Agentes tensoactivos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Otros	Degradación natural de materia orgánica.
<i>Inorgánicos:</i>	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, aguas de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, aguas de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y agua residuales domésticas.
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Contaminantes prioritarios	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Azufre	Agua de suministros; agua residuales domésticas, comerciales e industriales
<i>Gases:</i>	
Sulfuro de hidrógeno	Descomposición de residuos domésticos.
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Agua de suministro; infiltración de agua superficial.
<i>Constituyentes biológicos:</i>	
Animales	Cursos de agua y plantas de tratamiento.

Tabla 1.1 (Continuación)

Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento.
Protistas:	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Arqueobacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas.

Fuente: Metcalf y Eddy, (2014).

1.3 Indicadores de contaminación de las aguas residuales

Generalmente el nivel de contaminación que provocan las aguas residuales no se mide a partir del conocimiento de la concentración de los distintos constituyentes de las mismas, que pueden ser considerados contaminantes, sino con la determinación de parámetros globales como son la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) entre otros. En ocasiones, fundamentalmente en las que se trabaja con residuales industriales, las características de estos son tales que se requiere conocer constituyentes específicos, como pueden ser los metales pesados, tensoactivos, fenoles y otros (Menéndez y Pérez, 2007).

A continuación, se definen algunos de estos parámetros fundamentales que se tienen en cuenta para la determinación de la contaminación presente en las aguas residuales:

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación de la materia orgánica biodegradable, presente en la muestra de agua, como resultado de la acción de oxidación aerobia (Ramalho, 2003).

Según Raffo y Ruiz, (2014) la DBO es uno de los indicadores más importantes en la medición de la contaminación en aguas residuales, como también en el control del agua potable. Entre otras aplicaciones para la DBO, se encuentran:

- ❖ Medición de la calidad en las aguas superficiales y aguas residuales.
- ❖ Establecimiento de Límites Máximos Permisibles (LMP).
- ❖ Evaluación de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- ❖ Diseño de unidades de tratamiento biológicos.

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno brinda una medida más real de la cantidad de oxígeno requerida para la oxidación de la materia orgánica y carbonácea, con la utilización de un oxidante fuerte bajo condiciones ácidas (dicromato de potasio en medio ácido). La prueba de DQO mide el consumo de oxígeno durante la oxidación química de la materia orgánica. Los valores obtenidos son, por lo tanto, una indicación indirecta de los niveles de materia orgánica presente (Sperling, 2007).

Contenido de sólidos

Los sólidos en las aguas residuales pueden estar en forma suspendida, coloidal y disuelta. Todos ellos a su vez son de naturaleza inorgánica u orgánica. La fracción orgánica de los sólidos se determinan mediante, la pérdida por ignición a 600°C (Menéndez y Pérez, 2007).

Los sólidos pueden ser clasificados en diferentes categorías, tal como muestra el siguiente esquema:

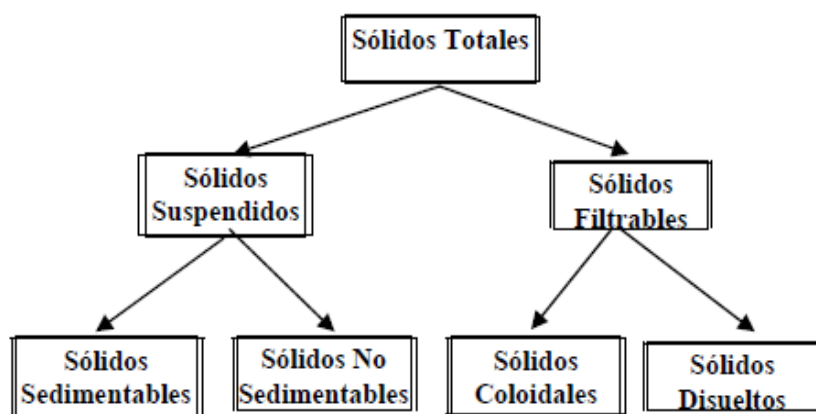


Figura 1.1 Clasificación de los Sólidos. **Fuente:** Menéndez y Pérez, (2007).

Nitrógeno

El nitrógeno en las aguas residuales puede presentarse principalmente en forma orgánica, como parte de proteínas, y en forma amoniacal. El nitrito y los nitratos rara vez aparecen en las aguas residuales crudas, y cuando existen, se trata fundamentalmente de aguas residuales industriales. Es importante conocer la presencia de diferentes formas del nitrógeno cuando se trata de aguas residuales para cuando se quiera diseñar un sistema de tratamiento biológico donde se debe cumplir que el contenido de nitrógeno guarde relación definida con la DBO y el fósforo, para que el proceso de depuración transcurra de manera adecuada (Menéndez y Pérez, 2007).

Fósforo

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, como fosfatos. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos órgano fosfatados. Estas formas de fosfatos provienen de una gran cantidad de fuentes, tales como productos de limpieza, fertilizantes y procesos biológicos. El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de agua puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos, en cantidades nocivas. Los fosfatos son sustancias solubles en agua, que las plantas necesitan para su desarrollo; pero si se encuentran en cantidad excesiva, inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos, que provocan la eutrofización de las aguas. Cuando estas algas y otros vegetales mueren, al ser descompuestos por los microorganismos, se agota el oxígeno (del agua) y se hace imposible la vida de otros seres vivos. El resultado es un agua maloliente e inutilizable (Marín y Osés, 2013).

1.4 Tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales es una práctica que, sin bien se realiza desde la antigüedad, hoy por hoy resulta algo fundamental para mantener nuestra calidad de vida. Son muchas las técnicas de tratamiento con larga tradición y, evidentemente, se ha mejorado mucho en el conocimiento y diseño de las mismas a lo largo de los años. Se debe tener en cuenta que los tratamientos a los que sean sometidos los efluentes tienen que garantizar la

eliminación o recuperación del compuesto orgánico en el grado requerido por la legislación que regula al vertido del efluente o para garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. Una de las formas más utilizadas de clasificación para los sistemas de tratamientos unitarios es en función de los contaminantes presentes en el agua residual o también en función del tratamiento (químico, físico o biológico) (Rodríguez *et al.*, 2006).

Según la autora estos tratamientos muy seguidamente son clasificados de acuerdo a las características de cada etapa de tratamiento, según se muestran a continuación.

1.4.1 Tratamiento preliminar

Comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, cuyo objetivo es separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias que por su naturaleza o tamaño pueden originar problemas en las etapas posteriores del tratamiento. El correcto diseño y posterior mantenimiento de la etapa de pretratamiento son aspectos de gran importancia, pues cualquier deficiencia de los mismos repercute negativamente en el resto de las instalaciones, y puede originar obstrucciones de tuberías, válvulas y bombas, desgaste de equipos y formación de costras. Las operaciones que comprende el pretratamiento generalmente son (Martín *et al.*, 2006):

Desbaste: consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos raíces etc.), así como de finos, que de otro modo podrían deteriorar o bloquear los equipos mecánicos y obstruir el paso de las corrientes de agua.

Tamizado: tiene por objetivo la reducción del contenido de sólidos en suspensión de las aguas residuales, mediante su filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso.

Desarenado: su objetivo es la extracción de la mayor cantidad posible de las arenas presentes en las aguas residuales. Dentro de la denominación “arenas” se incluyen las arenas propiamente dichas, gravas y partículas más o menos grandes de origen mineral u orgánico.

Desengrasado: en esta etapa se eliminan las grasas y demás materias flotantes de menor densidad que el agua.

1.4.2 Tratamiento primario

Dicho tratamiento consiste básicamente en la remoción de sólidos suspendidos de naturaleza orgánica e inorgánica, esta remoción es generalmente realizada mediante procesos de sedimentación o precipitación, además se puede hacer uso de algunos productos químicos para dar origen a la operación de coagulación-floculación y así hacer más efectivo el proceso. El efluente del tratamiento primario contiene, comúnmente, grandes cantidades de materia orgánica, por lo tanto, una DBO alta.

Algunos de los tratamientos primarios habitualmente utilizados son:

Flotación: es una operación unitaria usada para separar partículas sólidas o líquidas de una fase líquida. La separación se realiza con la introducción de finas burbujas de gas (usualmente aire) en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza de ascenso que experimenta la combinación partícula y burbuja de gas hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua (Metcalf y Eddy, 2014).

Sedimentación primaria: el objetivo del tratamiento por sedimentación es remover sólidos sedimentables y materiales flotantes encontrados en las aguas residuales y así reducir el contenido de sólidos suspendidos. Un sedimentador primario (tanque) eficientemente diseñado y operado puede remover desde 50 a 70% de los sólidos suspendidos y desde 25 a 40% de la DBO (Metcalf y Eddy, 2014).

Según la autora la sedimentación puede ser simple o con sustancias químicas, cuando se introducen estas últimas al sedimentador, se produce el proceso de coagulación-floculación el cual se define a continuación:

Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas (fundamentalmente coloides) se aglutinan en pequeñas masas, con peso

específico superior al del agua, llamadas flóculos. Mediante la coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide y queda anulada las fuerzas electrostáticas repulsivas, de forma que se neutralicen las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua (Lorenzo-Acosta, 2006).

El proceso de floculación logra desestabilizar partículas coloidales, precipitar y agrupar sólidos suspendidos, de esta manera se facilita la extracción por medio de la formación de flóculos (Ramírez *et al.*, 2011).

1.4.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se utiliza para eliminar los desechos y sustancias que, con los tratamientos anteriores no se eliminaron. Tradicionalmente consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Puede ser químico o biológico en dependencia del agente contaminante.

El procedimiento secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que las bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso se suele hacer con el traslado del efluente que sale del tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de lodos activados (Marín y Osés, 2013).

Lagunas de estabilización

Una laguna de estabilización es básicamente una vasija terrenal diseñada para contener y tratar aguas residuales, comúnmente llamada laguna de oxidación. Son usadas para tratar variedades de aguas residuales, desde aguas residuales domésticas hasta aguas industriales complejas, y funcionan bajo una amplia gama de condiciones atmosféricas, aunque usualmente es más preferido en zonas de clima caliente. Pueden emplearse solas o en combinación con otros procesos de tratamientos y se clasifican en aeróbicas, anaeróbicas y facultativas (Guyer, 2011).

Filtros percoladores

La corriente de aguas residuales se distribuye intermitentemente sobre un lecho o columna de algún medio poroso revestido con una película gelatinosa de microorganismos que actúan como agentes destructores. La materia orgánica de la corriente de agua residual es absorbida por la película microbiana y transformada en dióxido de carbono y agua. El proceso de goteo, cuando va precedido de sedimentación, puede reducir alrededor de un 85% la DBO₅ (Barroso, 2010).

Biorreactores de membranas

Una membrana en lo que respecta al tratamiento de agua y de aguas residuales, es simplemente un material que permite que algunos componentes físicos químicos o biológicos puedan pasar más fácilmente a través de ella que otros. Por lo tanto, se dice que las membranas son de permeabilidad selectiva, ya que son más permeable a los componentes que pasan a través de ella (que luego se convierten en el permeado—agua tratada) que aquellos que son rechazados (que forman el rechazo o concentrado). El grado de selectividad depende del tamaño de poro de la membrana, denominándose según su tamaño (de mayor a menor), en membranas de microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y de ósmosis inversas (OI). Los biorreactores de membranas combinan tratamiento biológico con filtración/separación por membrana de microfiltración o ultrafiltración. La producción de un producto permeado (agua filtrada) de alta calidad, clarificado y desinfectado en una única etapa (equivalente a una filtración terciaria); la operación a altas concentraciones de sólidos suspendidos del licor de mezcla, lo cual reduce el tamaño del reactor requerido y promueve el desarrollo de bacterias nitrificantes específicas y por lo tanto mejora la eliminación de amonio; y la reducción de la producción de lodo, son algunas de las ventajas ofrecidas por este proceso sobre los procesos convencionales de tratamiento biológico (Colectivo de autores, 2017).

Sistema de tratamiento por lodos activados

El tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados (**Figura 1.2**) tiene como objetivo la remoción de materia orgánica en términos de DQO de las

aguas residuales. Se clasifica como un método de tratamiento biológico aerobio en suspensión, su nombre proviene de la producción de una masa activa de microorganismos contenidos en un reactor capaces de metabolizar y consumir la materia orgánica presente en el agua residual en presencia de oxígeno.

Una planta de lodos activos es un sistema de mezcla completa, el ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos que pueden estar ubicados en el lecho o superficie del mismo. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un sedimentador para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga de sistema (Varila y Días, 2008).



Figura 1.2 Esquema del proceso de lodos activado convencional. **Fuente:** Colectivo de autores, (2017).

Elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados según Ruiz, (2014):

- ❖ Tanque de aireación: estructura donde el agua residual proveniente de los tratamientos primarios y los microorganismos son mezclados, produciéndose una reacción biológica.
- ❖ Equipo de aireación: se encarga de suministrar el oxígeno necesario al proceso de aireación para activar las bacterias heterótrofas.

- ❖ Sedimentador secundario: su objetivo es recibir el residual procedente del tanque de aireación y separar mediante sedimentación los sólidos suspendidos y obtener un sobrenadante clarificado.
- ❖ Sistema de retornos de lodos: este tiene el propósito de mantener la colonia de microorganismos en el tanque de aireación. Una gran parte de los sólidos biológicos sedimentados en el sedimentador se recircula al tanque de aireación.
- ❖ Exceso de lodos y su disposición: el exceso de lodos, debido al crecimiento bacteriano en el tanque de aireación, es extraído del sistema, tratado y dispuesto.

Eliminación de nutrientes

La autora considera que la preocupación creciente por proteger el medio ambiente ha propiciado la implementación continua de estándares cada vez más altos en los efluentes de las plantas de tratamiento. Esta situación ha impulsado los esfuerzos para mejorar la calidad de los efluentes, especialmente en cuanto a la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Los vertimientos de residuales ricos en nutrientes, en cuerpos de aguas, provocan serios daños a las plantas y organismos que forman parte del hábitat natural que estas poseen.

❖ Eliminación de Nitrógeno

La reducción de compuestos de nitrógeno en corrientes de aguas residuales recibe actualmente una atención especial debido a los problemas ambientales que acarrea el vertimiento de estos compuestos, como es el caso del incremento de la demanda de oxígeno en el cauce receptor y la aceleración del proceso de eutrofización. (Ramalho, 2003).

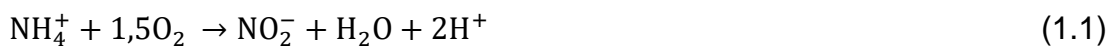
El nitrógeno viene de la biomasa microbiana presente en los lodos y de los residuos de las aguas residuales. En los lodos el nitrógeno se presenta en formas inorgánicas como nitratos y amonio, y en formas orgánicas como proteínas, amino ácidos, aminoazúcares, almidones, asociado con polímeros y otros (Andreoli *et al.*, 2007).

Nitrificación:

La nitrificación como su nombre lo indica es la producción de nitratos a partir de la oxidación del amonio, que actualmente se divide en dos procesos microbiológicos distintos ejecutado por dos grupos de bacterias autótrofas y aeróbicas: organismos oxidantes de amonio (X_{AOO} por sus siglas en inglés *Ammonium Oxidizing Organisms*) productores de nitrito y organismos oxidantes de nitrito (X_{NOO} por sus siglas en inglés *Nitrite Oxidizing Organisms*) productores de nitrato (Colectivo de autores, 2016).

Existen diversos factores que pueden afectar el proceso de nitrificación como son: la variación de la tasa específica de crecimiento de los organismos nitrificantes por los diferentes tipos de agua residual, disminución de la temperatura, presencia de zonas no aireadas en el reactor, concentración de oxígeno disuelto y valores de pH inferior y superior a 7 y 8 respectivamente. A continuación, se describen las ecuaciones estequiométricas para la nitrificación (Colectivo de autores, 2017).

Nitritación (primer paso de nitrificación):



Nitratación (segundo paso de la nitrificación):



Nitrificación (ecuación global):



Desnitrificación:

La nitrificación es un requisito previo a la desnitrificación, y sin esta la remoción biológica de nitrógeno no sería posible. Una vez que ocurre la nitrificación, es posible llevar a cabo la remoción biológica de nitrógeno mediante desnitrificación y debería ser incluida en los sistemas de tratamiento aun cuando la remoción de nitrógeno no sea un requerimiento con la incorporación en forma intencional de zonas no aireadas dentro del reactor (Colectivo de autores, 2017).

La desnitrificación es la conversión de nitratos en nitritos, y este en óxido de nitrógeno (N_2O) o nitrógeno gaseoso (Berland *et al.*, 2001). Este proceso se realiza en condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno, pero en presencia de nitratos), los nitratos son usados por organismos heterótrofos como un aceptor de electrón en lugar del oxígeno (Sperling, 2007).

Por su parte Metcalf y Eddy, (2014) alegan que la desnitrificación biológica es una parte integral del proceso de nitrificación y desnitrificación para la remoción biológica del nitrógeno, que con muy pocas excepciones es el método elegido para remover nitrógeno en los tratamientos de aguas residuales domésticas e industriales. La reducción de nitrato procede a través de una serie de productos intermedios, nitrito (NO_2^-), óxido nítrico (NO), y óxido nitroso (N_2O) a nitrógeno gaseoso (N_2) como se aprecia en la ecuación (1.4). El NO y N_2O son gases de nitrógeno y la emisión de N_2O es de gran importancia porque es uno de los más potentes gases de efecto invernadero.



❖ Eliminación de fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para el metabolismo de las algas por lo que una presencia muy alta de este en las aguas de vertido producirá un crecimiento masivo de algas que puede conducir a la eutrofización de ríos y lagos. Este elemento se encuentra principalmente en forma de ortofosfatos (PO_4^{3-}), polifosfatos (moléculas con dos o más átomos de fósforo) y fosfatos orgánicos.

Para eliminar el fósforo de las aguas residuales se pueden emplear procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos se basan en la adición de una especie que reaccione con los iones fosfato para formar un precipitado que se separa por sedimentación o filtración. Los compuestos más utilizados como agentes precipitantes son: hidróxido de calcio, alumbre y en ocasiones compuestos poliméricos. La eliminación biológica de fósforo con el empleo del sistema de lodos activos consta básicamente de una etapa anaerobia seguida de una etapa aerobia (Burgoa, 2015).

1.4.3.1 Sedimentación secundaria

La sedimentación secundaria o sedimentación final, en su nivel más fundamental, separa una fase sólida más pesada (la masa de lodo) de una fase líquida más ligera (agua tratada) por medio de la acción de la gravedad, por lo tanto, a menudo se denomina separación de fases sólido-líquido. La sedimentación inducida por la acción de la gravedad también se aplica en otros procesos, como por ejemplo para la clarificación de las aguas residuales crudas en sedimentadores primarios, o para el espesamiento de los lodos de purga (para reducir el contenido de agua).

El proceso se lleva a cabo por lo general en grandes tanques de concreto llamados sedimentadores secundarios o clarificadores secundarios (a criterio de la autora se puede emplear también el término decantadores secundarios), una de las formas más populares de clarificadores debido a un diseño mecánico más sencillo es el decantador circular generalmente con patrón de flujo radial (**Figura 1.3**). Los sedimentadores secundarios desempeñan múltiples funciones en el tratamiento de las aguas residuales, principalmente: (1) la clarificación, que produce un efluente con una cantidad mínima de sólidos, (2) el espesamiento, con la concentración del licor mezclado de los lodos activados (con una recirculación interna al tanque de lodos activados), y (3) el almacenamiento de lodos, por lo general de forma temporal, en períodos con altas precipitaciones pluviales y por consiguiente altos caudales afluentes.

El efluente de un clarificador bien diseñado y operado generalmente contiene entre 5 y 15 mg/L de sólidos suspendidos. Con el conocimiento de que el intervalo típico de la concentración de sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM) se ubica entre 1500 y 3500 mg/L, se espera que la eficiencia del clarificador se encuentre en un rango de entre 99% y 99.9%.

Los lodos sedimentados en el fondo del clarificador regresan al reactor de lodos activados de forma continua. A medida que existe una mayor concentración de sólidos en los lodos de la recirculación o lodos de retorno, menor será el flujo requerido de retorno. Un clarificador bien diseñado (siempre que el sistema biológico funcione de manera óptima) generará sólidos

altamente espesos (típicamente de 7-12 kg SST/m³, SST Sólidos Suspendidos Totales) para el flujo de recirculación de sólidos (Colectivo de autores, 2017).

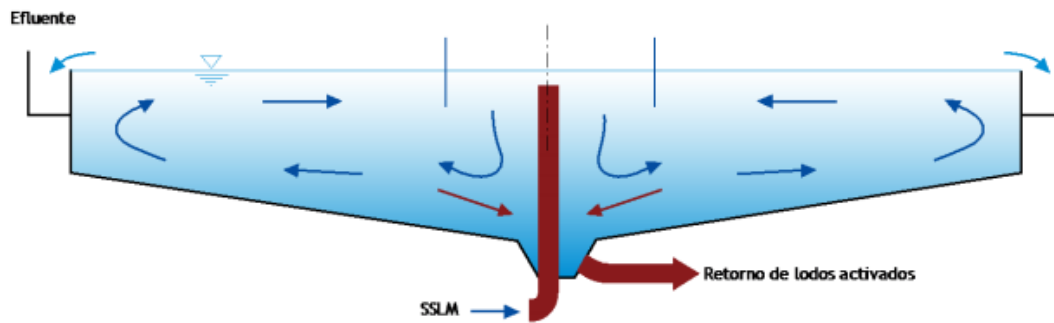


Figura 1.3 Ilustración conceptual de un tanque de sedimentación circular con patrón de flujo radial. **Fuente:** Colectivo de autores, (2017).

1.4.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario es el procedimiento que se emplea al final del proceso de tratamiento de las aguas residuales, pero no ha sido ampliamente adoptado por sus elevados costos. Este tratamiento consiste en un proceso físico-químico que utiliza la precipitación, la filtración y/o la cloración para reducir drásticamente los niveles de nutrientes inorgánicos, especialmente los fosfatos y nitratos del efluente final. El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido, antes de que este sea descargado al ambiente receptor (mar, río, lago o campo,). El agua residual que recibe un tratamiento terciario adecuado no permite un desarrollo microbiano (Marín y Osés, 2013).

1.5 Características, composición, tratamiento y gestión de lodos residuales

Los principales constituyentes del agua residual en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arena, espuma y lodo, es así que el lodo producido en las operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales depende principalmente de las características del agua residual, de su edad y del proceso de tratamiento utilizado en la planta que lo genera. Los lodos están compuestos generalmente por un cultivo mixto de microorganismos que forma, junto con otras sustancias orgánicas e inorgánicas un conglomerado floculento. Este residuo es de gran importancia ya que es una fuente potencial de materia

orgánica y energía, sin embargo, al no tener un manejo adecuado, se convierte en un problema, debido a su alto contenido de patógenos y metales pesados, por lo que se requiere un proceso de estabilización (Pérez, 2016; Galvis y Rivera, 2013).

Los lodos sin estabilizar contienen sustancias orgánicas susceptibles de putrefacción, así como formas patógenas de bacterias, virus y helmintos. Por este motivo, el lodo debe ser tratado antes de su disposición final o reutilización en el suelo para evitar efectos negativos sobre el medioambiente. Tanto por razones económicas como ecológicas, es aconsejable reintegrar los fangos tratados al ciclo natural; ello requiere que los lodos sean estabilizados y desinfectados hasta niveles aceptables (Llore, 2008).

Los tratamientos de los lodos residuales están dirigidos fundamentalmente a la reducción de su poder fermentativo, lo que conduce a eliminar o disminuir los malos olores y su potencial de putrefacción, a continuación, se describen algunos de los tratamientos más empleados.

Estabilización: Como la palabra lo indica el propósito de este tratamiento es el de proporcionarle estabilidad al lodo, para impedir así, que este sea sujeto posteriormente a un proceso de descomposición. Algunos de los procesos de estabilización son la digestión aerobia, digestión anaerobia, incineración y mediante adiciones químicas.

Espesamiento: Se realiza con el objetivo de incrementar el contenido de sólidos y remover el líquido generado. Este proceso puede ser por gravedad, flotación o centrifugación.

Desinfección: Este tratamiento es esencial para la eliminación de organismos patógenos que no hayan sido exterminados en procesos anteriores.

Según Pérez, (2016) los métodos más adecuados para la desinfección son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo.

Los lodos residuales generalmente son depositados en vertederos o como relleno sanitario, práctica que provoca contaminación ambiental debido al alto contenido de organismos patógenos, metales pesados y otras sustancias

contaminantes que poseen al no ser sometidos a los diversos tratamientos requeridos.

En aras de preservar el bienestar de la salud humana y del medio ambiente, en los últimos años se han realizado disímiles investigaciones en torno al uso de los lodos residuales generados principalmente en las estaciones depuradoras de aguas residuales, se ha reportado ser de gran utilidad, entre otros, en el mejoramiento del suelo, uso agrícola y forestal y para la obtención de carbón activado.

Según EFE verde, (2017) estudios realizados en la Universidad de Las Palmas Gran Canaria, han podido comprobar que transformar el lodo de depuradora en compost, mezclándolo con residuos vegetales, produce un fertilizante que rinde tanto o más que el abono empleado en jardinería, agricultura y tratamientos forestales. Con una ventaja añadida: ahorra mucha agua. En sus ensayos se muestra que mientras un suelo sin ningún tipo de fertilizante retiene un 40% del agua que se le aporta mediante riego, el tratado con abono conserva el 35% y el enriquecido con tres dosis de compost de lodo de depuradora consigue aprovechar casi todo el riego, el 97%. Además, dicho compost puede ser utilizado con total seguridad en cultivos destinados a la alimentación, porque no contiene contaminantes. E incluso resulta más limpio que el fertilizante convencional porque genera menos aporte de nitratos y nitritos.

Por otra parte, Gonzáles *et al.*, (2006) explican que es posible la obtención de carbón activado a partir de lodos de depuradoras urbanas como mecanismo de gestión de estos residuos. Explican que mediante el control de parámetros o variables durante el proceso de activación ya sea químico o físico, se puede favorecer el desarrollo de una estructura porosa determinada. En estudios aportados por Trujillo-Reyes *et al.*, (2008) demuestran la obtención de carbón activado a partir de un tratamiento térmico llamado pirólisis y se realizó con lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales. Explican que antes de iniciar el proceso térmico, primeramente se elimina el exceso de agua mediante un secado al sol en una plataforma de concreto donde se coloca el lodo sobre una cubierta plástica durante 15 días a una temperatura promedio de 22,5 °C. Posterior a esto, se adicionaron

aproximadamente 500 g de lodo en un reactor construido en lámina de acero inoxidable, al cual se acopló un tubo del mismo material, una salida para gases mediante un refrigerante y un codo de vidrio; el refrigerante se conectó a un sistema de enfriamiento para mantener la temperatura a $10\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Una vez cargado el reactor, se introduce en la mufla a una temperatura de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo de 75 min. Después del tratamiento térmico de los lodos residuales, las cenizas obtenidas se tamizan hasta tener un diámetro de partícula de 0,42 a 0,84 mm, debido a que el carbón activado comercial posee dicho tamaño y servirá a manera de comparación. Terminado esto, el carbón activado se lava con una solución de HCl al 5% y se deja secar en una estufa a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 días.

1.6 Microorganismos eficientes (EM)

El concepto de microorganismos eficientes (EM por sus siglas en inglés *Effective Microorganisms*) fue descubierto por Teuro Higa, un japonés horticultor de la Universidad de Ryukyus en Japón. Él reportó en 1970 una combinación de aproximadamente 80 tipos diferentes de microorganismos capaces de influenciar positivamente en la descomposición de la materia orgánica. Sus estudios han mostrado que los microorganismos eficientes pueden tener aplicaciones en la agricultura, el ganado, la jardinería, compostaje, como limpiador de tanques sépticos, control de algas, usos caseros, tratamiento de aguas residuales y otros (Higa y Parr, 1994).

Según Azwita, (2009) los EM consisten en bacterias beneficiosas que son usadas con el propósito de prevenir enfermedades, disminuye el crecimiento de bacterias patógenas, e incrementa la eficiencia en la descomposición de la materia orgánica. También pueden prevenir la formación de reacciones químicas de bacterias no beneficiosas y así ayudar a incrementar la microbiología ambiental que lleva a un entorno saludable. Las bacterias en una solución de microorganismos eficientes pueden incrementar el oxígeno disuelto, estabilizar el pH del agua, reducir olor y turbiedad, reducir nutrientes, disminuir los niveles de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), de la demanda química de oxígeno (DQO), de la producción de gas sulfuro de hidrógeno, y los niveles de hierro y magnesio.

1.6.1 Microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales (lodos activados)

El uso de microorganismos eficientes ha sido reportado como una alternativa para solucionar los problemas de contaminación hídrica. Ellos pueden utilizar los compuestos contaminantes presentes en las aguas como fuente de carbono y energía para su metabolismo y crecimiento (Romero y Vargas, 2017).

El uso de microorganismos eficientes para el tratamiento de aguas residuales ha sido utilizado exitosamente en numerosos estudios, debido a que los microorganismos que contienen, producen ácidos orgánicos, enzimas antioxidantes, y quelantes metálicos, los cuales crean un ambiente antioxidante que ayuda al proceso de separación sólido/líquido, el cual es el fundamento de la depuración del agua (Bejerano y Escobar, 2015).

Dentro de la aplicación de los microorganismos eficientes para el tratamiento de aguas residuales se ha utilizado el sistema de lodos activados. Los resultados mostraron que el consumo de oxígeno en el sistema de tratamiento disminuye, al igual que la producción de lodos, la DQO y los malos olores. De igual forma, se han reportado mejoras significativas en parámetros como alcalinidad, pH, conductividad, sólidos totales y disminución en el contenido de coliformes en el agua (Cardona y García, 2008).

Los microorganismos eficientes están compuestos fundamentalmente por:

Bacterias fotosintéticas

Dentro del gremio de organismos fotosintéticos que forman parte de los microorganismos eficientes se encuentra *Rhodospseudomonas palustris*. Se trata de bacterias fototrópicas facultativas clasificadas dentro de las bacterias púrpura no del azufre, el cual comprende un grupo variado, tanto en morfología, filogenia y su tolerancia a diferentes concentraciones de azufre.

Son microorganismos capaces de producir aminoácidos, ácidos orgánicos y sustancias y bioactivas como hormonas, vitaminas y azúcares empleados por otros microorganismos, heterótrofos en general, como sustratos para incrementar sus poblaciones. *Rhodospseudomonas palustris* es encontrada comúnmente en suelos y aguas y posee un metabolismo muy versátil al

degradar y reciclar gran variedad de compuestos aromáticos como bencénicos de varios tipos encontrados en el petróleo, lignina y sus compuestos constituyentes y por lo tanto está implicado en el manejo y reciclaje de compuestos carbonados. No sólo puede convertir CO₂ en material celular sino también N₂ en amonio y producir H₂ gaseoso. Crece tanto en presencia como en ausencia de oxígeno a temperaturas de 30-37°C y pH 6,9 (rango 5,5-8,5). En consideración a las condiciones de crecimiento para la bacteria *Rhodospseudomonas palustris* y estudios donde se optimiza el crecimiento de estos microorganismos bajo condiciones de anaerobias para el tratamiento de aguas residuales, se considera que las poblaciones de estos microorganismos pueden llegar a adaptarse de forma exitosa a las condiciones que presentan las aguas residuales domésticas (Beltrán y Campos, 2016).

Bacterias ácido lácticas

Estas bacterias son las más abundantes dentro del gremio que conforman el multicultivo de los microorganismos eficientes. Se producen a partir de azúcares y otros carbohidratos generados por bacterias fotosintéticas y levaduras, como parte de su metabolismo. El ácido láctico es un componente con propiedades bactericidas que pueden suprimir a los microorganismos patógenos, mientras ayuda a la descomposición de la materia orgánica, incluso en el caso de compuestos recalcitrantes como la lignina o la celulosa, ayuda a evitar los efectos negativos de la materia orgánica que no puede ser descompuesta.

En lo que se refiere a los requerimientos de crecimiento para el grupo de las bacterias ácido lácticas, se encuentran como generalidades que estas son bacterias microaerófilas, razón por la que debe procurarse que la incubación se realice en una atmósfera con 5% de CO₂. Por lo general, para su crecimiento se emplean una incubación de 3 días, a 37 °C o hasta 5 días a 30 °C, puesto que son microorganismos de crecimiento relativamente lento y sus rendimientos metabólicos dependen de la temperatura directamente (Beltrán y Campos, 2016).

Levaduras

El tercer grupo dentro de los gremios de microorganismos presentes en los microorganismos eficientes son las levaduras. Estos microorganismos sintetizan sustancias antimicrobianas a partir azúcares, y aminoácidos secretados por las bacterias fotosintéticas, también producen sustancias bioactivas como hormonas y enzimas que son sustancias empleadas por las bacterias ácidolácticas presentes. Como parte de su metabolismo fermentativo, las levaduras producen etanol en relativamente altas concentraciones, que es también reconocida como sustancia antimicrobiana. Se asume por lo tanto que, al degradar los carbohidratos presentes en las aguas residuales, se producirá etanol, el cual puede funcionar como sustancia antagónica frente a microorganismos patógenos.

Para las poblaciones de levaduras, la temperatura óptima se ha establecido en 28,5°C, dado que a mayores temperaturas disminuye el rendimiento, probablemente debido al aumento de energía de mantenimiento. El rendimiento celular puede también afectarse por la presencia de inhibidores como SO₂, ácido aconítico y metales pesados o restos de herbicidas o bactericidas que pueden estar presentes en las melazas (Beltrán y Campos, 2016).

1.6.2 Usos de los Microorganismos eficientes

El EM tiene una amplia gama de aplicaciones para solucionar problemas ambientales, en la agricultura, la producción animal, la salud y hasta la construcción. A continuación, se describen este conjunto de aplicaciones basa en la información aportada por el BID, (2009):

Medio ambiente

Tratamiento de aguas residuales

El EM tiene la capacidad de suprimir los microorganismos patógenos de las aguas servidas y de eliminar el mal olor de las mismas. Para ello debe emplearse EM Activado en una dosis de 1 litro cada 1000 litro de agua a tratar. En el caso de piletas de tratamiento de aguas, el uso del EM producirá una reducción de la contaminación orgánica (DBO) y química (DQO) y disminuirá el volumen de lodos producidos.

Tratamiento de vertederos de residuos

Los vertederos de residuos sólidos urbanos, corrientemente conocidos como basureros municipales, suelen tener problemas de moscas y malos olores generados principalmente por el metano, mercaptano y ácido sulfhídrico, producto de la descomposición de los materiales orgánicos. La utilización del EM reducirá estos malos olores y disminuirá la población de moscas, con el consiguiente beneficio para los vecinos y trabajadores. Además, el metano es un gas que tiene un efecto invernadero muy marcado, por lo cual también se colaborará a evitar el calentamiento global.

Otros usos en el hogar

El EM también se puede emplear para otros usos domésticos: evitar malos olores (cigarrillos, cocina, baño, ropa, mascotas), reducir la población de moscas, evitar la cría de mosquitos en aguas estancadas (foreros, piletas), mantener limpias las graseras, lavar los pisos, el baño, la cocina, la vajilla. En Japón se ha fabricado una cerámica que combina arcilla con una formulación de EM (EM X) y se ha comprobado que este material mantiene las propiedades de purificar el agua al igual que el EM activado (EMA). Anillos y pequeños tubos de este material pueden utilizarse para mejorar la calidad de tanques de agua, peceras y piscinas. Este producto es conocido en algunos países como EM-X Cerámica.

Agricultura

Aplicación al suelo

Los microorganismos eficientes se pueden aplicar directamente al suelo o empleándolo en el agua de riego. Esto ayuda a proteger el cultivo de nematodos y de patógenos de suelo, favorece el desarrollo de otros pobladores benéficos y promueve que se solubilizan ciertos nutrientes del suelo y de esta manera queda más fácilmente disponible para las plantas. El EM-Compost es un material orgánico que sirve como enmienda para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, tiene la ventaja con respecto al compost común que el uso de los microorganismos efectivos acelera la

descomposición de la materia orgánica y neutralizan los malos olores generados en el proceso.

Tratamiento de semillas

La inmersión de las semillas en una solución de EMA mejora la germinación y le brinda a las mismas una cierta protección contra agentes patógenos desde el principio. Algunas especies de plantas pueden ser sensibles a la acidez del EM por lo que conviene siempre hacer una prueba antes con una pequeña cantidad de semillas para asegurarse que no habrá problemas.

Tratamiento post cosecha

El empleo de EM en la post cosecha de los frutos mejora su conservación debido a su acción antioxidante y al antagonismo que produce contra algunos patógenos. También se puede emplear para desinfectar cajones cosecheros, *bins*, cámaras y el área de empaque y almacenamiento de las hortalizas.

Producción animal

Criaderos de aves y cerdos

En los criaderos de aves y cerdos la aplicación de EM contribuye a la disminución de los malos olores la reducción de la población de moscas, el mejor aprovechamiento del estiércol y el ahorro de agua.

Apicultura

Estudios realizados demuestran que el EM es efectivo en el control de la enfermedad conocida como *Loque Americana* causada por el microorganismo *Paeni bacillus larvae*. El tratamiento consiste en pulverizar los cuadros con una solución de EM al 5%, con lo que se obtuvo una reducción significativa en el número de esporas producidas por este patógeno. También se constató que resultaba completamente inofensivo para las abejas.

Prevención del meteorismo bovino

El meteorismo de los rumiantes es una alteración digestiva que suele ocurrir en la ocasión que los animales pastorean en praderas de leguminosas, puras o consociadas, y representa una fuerte restricción al aprovechamiento de la

pastura, constituye además una de las principales alteraciones de la salud y causa de muerte en la invernada. La adopción de la Tecnología EM cambia la flora rumial y permite disminuir este problema, que favorece a un aprovechamiento más eficiente del forraje.

Otros usos

Salud

El EM además tener un efecto positivo sobre los animales también ayuda a mejorar la salud de los seres humanos. Actúa como antioxidante, que inactivan a los radicales libres responsables de múltiples enfermedades y de los procesos de envejecimiento. Su segundo efecto es de deionización, que previene la adquisición de cargas eléctricas a nivel molecular que participan en el proceso de deterioro del organismo. También ayuda a controlar patógenos como hongos y bacterias de la piel.

Construcción

El EM contiene sustancias y enzimas antioxidantes, que evitan la oxidación de los materiales, proporcionándoles mayor dureza y duración. Su mezcla con el hormigón permite un fraguado y un secado del mismo mucho más rápido. Además, la aplicación de su uso mezclándolo con pinturas previene las emanaciones tóxicas de formaldehidos, tolueno y xileno presente en algunos materiales usados en contrachapado, empapelados, pegamentos o colas de parquets.

A consideración de la autora es asombrosa y muy amplia la gama de aplicaciones en los que pueden ser empleados los microorganismos eficientes, que, si bien son muchas más que las que se han descrito aquí, considera que las antes mencionadas son de las que más utilidad y beneficio tienen en la vida cotidiana.

1.7 Conclusiones parciales del capítulo

1. Las aguas residuales son clasificadas de acuerdo a su fuente de procedencia, y están compuestas además de agua por materia sólida, fundamentalmente materia mineral y orgánica.

2. Las aguas residuales poseen numerosos constituyentes físicos, químicos y microbiológicos de diferentes tipos de procedencia.
3. Para determinar si un agua está contaminada o no, se miden parámetros globales como la DBO, DQO, contenido de sólido, nitrógeno y fósforo.
4. Los tratamientos de las aguas residuales pueden ser clasificados en función de los contaminantes presentes, en función del tratamiento (físico, químico o biológico) o de acuerdo a las características de cada etapa de tratamiento como sugiere la autora.
5. Los lodos generados en la PTR “Las Conchas” lejos de ser un problema pueden ser de gran utilización y beneficio si se emplean en el sector de la agricultura, así como otros sectores industriales, como ejemplo la producción de carbón activado.
6. El EM tiene una amplia gama de aplicaciones para solucionar problemas ambientales, en la agricultura, la producción animal, la salud y hasta la construcción.

Capítulo 2 Materiales y Métodos

En el presente capítulo se exponen los materiales y métodos que se emplean en la investigación, además se muestran las técnicas empleadas para el estudio de las aguas residuales procedentes del sistema de tratamientos por lodos activados “Las Conchas” en la etapa de decantación secundaria. El esquema metodológico de la investigación correspondiente se describe a continuación:

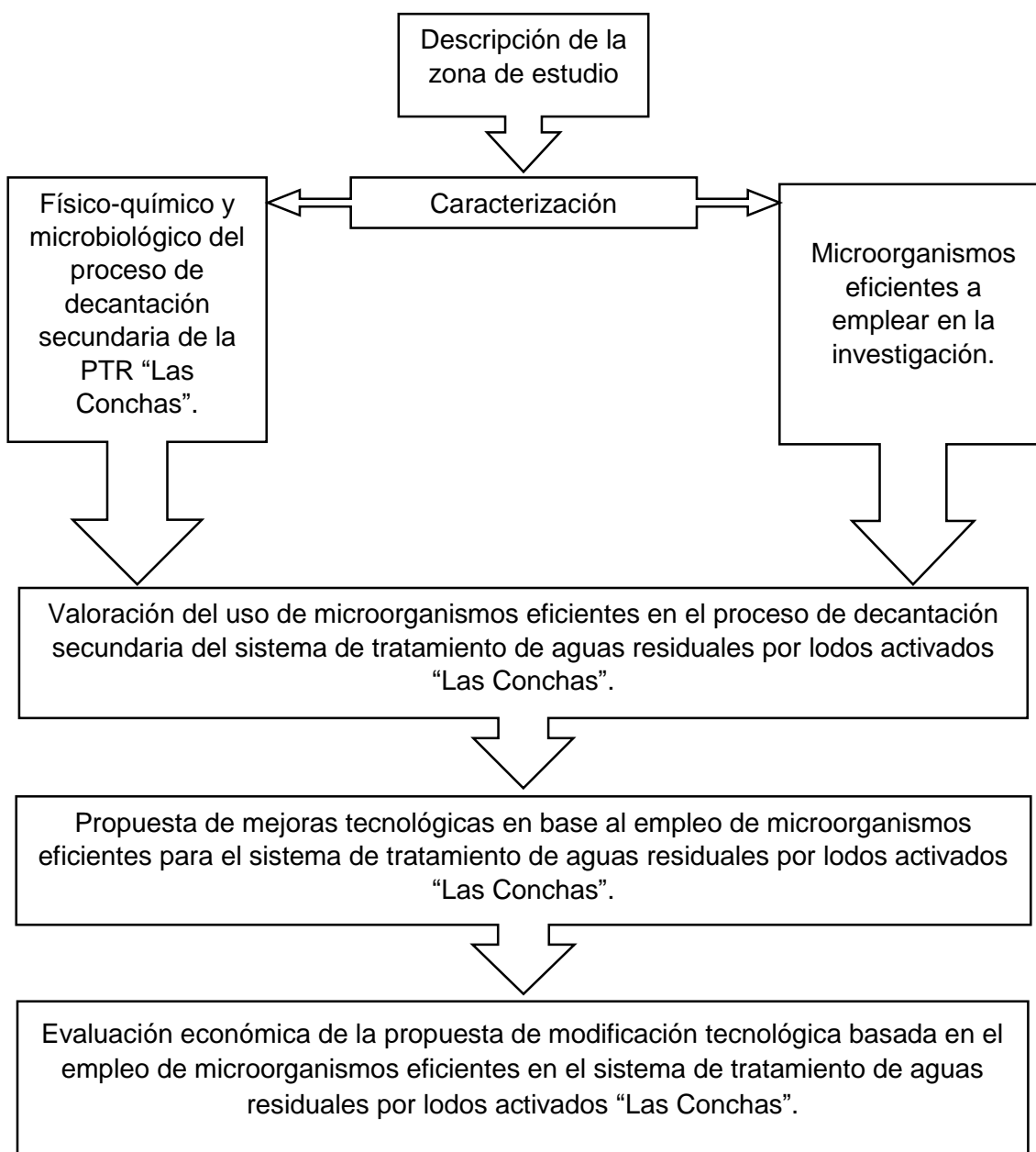


Figura 2.1 Esquema metodológico de la investigación. **Fuente:** Elaboración propia.

2.1 Descripción de la zona de estudio. Península de Hicacos (Varadero)

La Península de Hicacos (Varadero) se localiza al norte de la provincia de Matanzas (**Figura 2.2**). Limita al norte con el estrecho de La Florida, al sur con la bahía de Cárdenas, al este con Cárdenas, al oeste con la cayería Sabana Camagüey. Posee 30 km de extensión de los cuales 22 km son de playas, es estrecha y alargada orientada a 70 grados acimut (Suroeste - Noreste). Su parte más estrecha mide 400 m y 1500 m la más ancha, la cual llega a ser inferior a un kilómetro en su anchura promedio.



Figura 2.2 Ubicación geográfica de la Península de Hicacos (Varadero).

Fuente: NASA World Wind Globe (2019).

La Planta de tratamiento residual (PTR) “Las Conchas” (**Figura 2.3**), es responsable del proceso de depuración de las aguas residuales precedentes de la actividad turística en la península, se encuentra enclavada en el litoral sur de la península y cercana de la PTR Sol Palmeras y el *baching plane* con un área de 120m x 50m (600 m²). Dicha planta es de nueva construcción (2015) y resulta ser un sistema convencional de lodos activados, con la novedad tecnológica de poseer un sistema anóxico integrado (Pupo, 2016).



Figura 2.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Las Conchas”.
Fuente: (Satellites. pro, 2019).

2.2 Descripción del proceso tecnológico en la PTR “Las Conchas”

La PTR “Las Conchas” surge por la necesidad de dar solución a los residuales generados provenientes de 1297 habitaciones en construcción del sector hotelero ubicadas en los hoteles *Ocean Vista Azul*, *Iberostar Bella Vista* y un incremento de 549 habitaciones. En la planta la totalidad de los equipos poseerán dos regímenes es de operación. Uno de manera manual, que garantice el ajuste de los esquemas operacionales, permita la comprobación mediante pruebas ante determinadas fallas, reparaciones y mantenimiento, y el otro es de manera automática que es como normalmente funcionará. Dicha planta comparte las mismas características de operación con las PTR “Chapelín” y PTR “Calle K”.

El sistema de tratamiento de la PTR “Las Conchas” cuyo diagrama de flujo corresponde al **Anexo 1** consta de tres etapas fundamentales (Pretratamiento, Tratamiento secundario y Tratamiento terciario), las cuales son descritas a continuación en base al manual de operaciones de la planta (Pupo, 2016).

Pretratamiento

El pretratamiento está compuesto como se indica en el **Anexo 2** por una unidad combinada compacta y un tanque homogeneizador. El residual crudo entra al pretratamiento por bombeo mediante tubería de PEAD Dn=200 mm

procedente de la estación de bombeo ubicada dentro del hotel Ocean Vista Azul y seguidamente se incorpora a la unidad combinada compacta fabricada con acero inoxidable (**Tabla 2.1**), la cual se encarga de la eliminación de sólidos, grasas y arena, con una eficiencia esperada de 90 %. La misma se encuentra colocada sobre la losa de cubierta del tanque homogeneizador y posee una conexión de *bypass* directo al mismo en caso de rotura, para evitar de esta manera el derrame sin tratamiento al medio. El pretratamiento está concebido para asumir todo el caudal de diseño.

Tabla 2.1 Características de la unidad combinada compacta.

Características:	Unidad de medida	Cantidad
Caudal máximo	L/s	45,00
Conexiones entrada y salida	mm	200
Tamiz paso de malla	mm	3
Sinfín inclinado extracción y compactador de sólidos potencia estimada	kW	0,75
Desarenador: transportador sinfín horizontal y extracción sinfín inclinado potencia estimada		0,55
Desengrasador con rasqueta potencia estimada		0,12
Sistema de aireación por difusores y soplante; potencia estimada		0,55

Medidor de caudal:

La medición se realiza mediante un caudalímetro electromagnético Dn=150 mm (el mismo no posee visualización), instalado en la tubería que conduce el residual desde la salida del pretratamiento hasta el tanque homogeneizador, con indicación instantáneo en el panel central, del caudal y el total.

Tanque de homogenización:

Este es un tanque ubicado a la entrada de la planta y construido por elementos de Hormigón fundido "*in situ*", el cual recepciona el caudal proveniente de la unidad combinada. Cuenta con un volumen útil de 216 m³ además de utilizar

un volumen adicional de 60 m³. El volumen útil absorbe las variaciones del caudal; mientras que el adicional se requiere para mantener un nivel mínimo para la aireación en el tanque, que evite la proliferación de olores desagradables. A un lateral del tanque posee las dos bombas (1+1 reserva) del tipo sumergible con montaje horizontal en seco y con carga de succión, las cuales impulsarán el agua al tanque de anoxia. En dicho tanque se realiza la aireación y mezcla del residual para evitar la sedimentación de partículas mediante un aireador sumergido con autoaspiración de aire tipo *Venturi-jet*.

Tratamiento secundario. Proceso de lodos activados

El proceso de lodos activados está basado en la capacidad que tienen los microorganismos para producir y sostener la biomasa con el uso de materia orgánica con base de carbono como fuente de nutrientes. Dicho esquema de tratamiento de lodos activos consiste específicamente en alcanzar en conjunto la Nitrificación-Desnitrificación y se logra con la creación de un reactor anóxico que se coloca aguas arriba del aerobio, que recibe el caudal de agua a tratar y la recirculación de fangos. Los equipos descritos a continuación, pertenecientes a esta etapa de tratamiento se ilustran en el **Anexo 3**.

Tanque de anoxia:

El tanque está conformado en hormigón armado fundido "*in situ*", presenta un volumen de 318 m³ y posee un "*Mixer*" (equipo mecánico sumergido de mezclado) con el objetivo de mantener los lodos en suspensión. Este dispositivo de tratamiento resulta novedoso en el sistema de lodos activados para la empresa Aguas Varadero S.A ya que es la primera planta de tratamiento que lo posee y como su nombre lo indica no es más que la degradación o ausencia del oxígeno y la proliferación de otros oxidantes (nitratos). En este tanque ocurre la reacción de reducción bioquímica de nitrato a nitrógeno molecular gaseoso (N₂), con un aporte equivalente de oxígeno, realizándolo las bacterias heterótrofas anaerobias facultativas (*pseudomonas* principalmente); cuya fuente de carbono es, la orgánica.

Aireación:

En esta etapa se produce la transformación por vía biológica, de la materia carbonácea y los compuestos nitrogenados presentes en el residual, en forma de materias coloidales y disueltas, hasta niveles que permitan su vertimiento al medio ambiente. La aireación se necesita para mantener las condiciones aeróbicas en el depósito, así como para crear una agitación suficiente para mantener los microorganismos en suspensión, además, mediante la aireación se satisface la demanda de oxígeno de los microorganismos para la oxidación, síntesis, respiración endógena y la nitrificación.

El tanque de aireación conformado en hormigón fundido "*in situ*", presenta cuatro compartimientos de aireación que disponen de un sistema de parrillas con difusores de burbuja fina, fijadas al fondo de los compartimientos y tres equipos soplante de émbolos rotativos (2+1) que operan mediante un sistema automático de regulación de caudal, que, a partir de una sonda medidora de oxígeno disuelto, regula la cantidad de oxígeno necesario para un rendimiento máximo del sistema

La recirculación interna prevista del licor nitrificado, en una relación de hasta el 120% del caudal promedio, proveniente del tanque de aireación hasta el tanque de anoxia, se realizará mediante un grupo de bombeo (1+1 reserva) de montaje horizontal en seco y carga de succión positiva, que tomará de cada compartimiento.

Decantador circular:

Después del nivel de aireación, la mezcla de microorganismos y agua, llamado Lodos Activados, se dirige a un tanque de decantación donde el fango se separa del efluente tratado. El volumen del sedimento microbiano es recirculado hacia el tanque de anoxia para mantener en el mismo la concentración necesaria de microorganismos. La masa microbiana sobrante se retira del proceso como fango en exceso. El decantador circular es de flujo radial, con 16 m de diámetro conformado en hormigón armado fundido "*in situ*" y equipado con un puente raspador de tracción periférica. El fondo posee una inclinación del 10%, desde las paredes perimetrales hacia el centro del decantador.

El líquido sedimentado, se incorpora por unas canaletas perimetrales, hacia el tratamiento terciario. Las canaletas perimetrales con vertedores metálicas de perfil triangular “*Thompson*” y deflectores, ambos de acero inoxidable, a fin de lograr la mayor eficiencia en la separación de sólidos.

Las espumas y flotantes se conducen por raspado superficial, hacia una caja recolectora, donde se evacúan hacia un registro de acumulación, para ser bombeadas hacia el espesador de fangos.

Los fangos en exceso del decantador son conducidos mediante un (1) equipo de bombeo, hacia el espesador de fangos.

Tratamiento terciario

La desinfección del efluente líquido de la decantación secundaria correspondiente al **Anexo 4**, se hace necesario para cumplimentar con los límites máximos permisibles de los parámetros para las aguas de reuso. En este caso el agente químico empleado para la desinfección es el hipoclorito sódico (sin dilución), con concentración comercial de cloro activo $CL_2 > 80$ g/L (mínima), en dosis promedio de 5 a 6 mg/L (estimada). De esto se encarga una bomba dosificadora de membrana, de accionamiento por electromagneto de 5,0 L/h, con montaje sobre depósito.

El líquido efluente de la decantación secundaria es filtrado antes de realizar la cloración. La filtración garantiza la reducción de los sólidos en suspensión, así como la del fósforo total.

El sistema de lavado se encuentra diseñado por agua y aire y los parámetros de trabajo están definidos por la variación de la presión interna de los filtros. El agua de lavado se vierte al alcantarillado que conduce hacia la estación de bombeo de retorno de efluente, consistente en el pozo de bombeo con las bombas sumergibles que lo impulsaran hasta el tanque de anoxia.

El agua filtrada pasa a la cisterna con salida por gravedad mediante una tubería de PEAD Dn=110 mm hacia las cisternas de agua de reuso de los hoteles. Las cisternas de agua filtrada y no filtrada, cuentan con un reboso hacia el alcantarillado que conduce al punto de vertimiento final.

Aguas en exceso:

Las aguas que no serán reutilizadas se dirigen por reboso antes de la filtración al drenaje pluvial de la zona incorporándose al mar con posteridad.

Tratamiento de lodos

Los lodos en exceso extraídos del decantador secundario, son conducidos por bombeo hacia el espesador de lodos, para reducir los volúmenes de líquido en el mismo, con el aumento de la concentración del lodo a valores de 2,50%, y así facilitar con ello el posterior secado del mismo. El espesador resulta ser un depósito circular de sección cilindro-cónica y diámetro de 4,50m, realizado en hormigón armado fundido “*in situ*”. Dispone equipado con un puente raspador de tracción central, con rasquetas de fondo móviles y un dispositivo agitador suave. El fondo posee una pendiente con inclinación del 18% desde las paredes perimetrales hacia el centro del espesador.

Los lodos del fondo del espesador pasan a los lechos de secados (**Anexo 5**). En este órgano, se espera obtener una concentración de los fangos de hasta un 35% y no requieren del secado al 100%, para realizar su manejo. Los lodos ya secados, pueden ser utilizados como bioabono en la jardinería de los hoteles o como relleno de capa orgánica en suelos áridos.

El efluente líquido se incorpora por unas canaletas perimetrales hacia la salida de la unidad.

2.3 Análisis físico-químico y microbiológico de las aguas residuales procedentes del tanque de aireación perteneciente al sistema por lodos activados “Las Conchas”

Las aguas residuales procedentes del tanque de aireación perteneciente al sistema por lodos activados “Las Conchas”, se caracterizan por ser un líquido turbio de color oscuro debido a la presencia de sólidos suspendidos en el licor mezclado y de olor desagradable.

Para la realización de los análisis físico-químico y microbiológico de dichas aguas residuales se obtienen muestras a la salida del tanque de aireación en el periodo comprendido en los meses de febrero, marzo y abril del presente año

2019. Se emplearán microorganismos eficientes con el objetivo de determinar su efectividad en la remoción de compuestos contaminantes.

La toma de muestras para el análisis físico-químico se realiza según lo establecido por la norma ISO 5667/1: 93. Estas se recaudan en envases de vidrio color ámbar con capacidad de 5 litro y seguidamente son conservadas a temperaturas de 2-5 °C hasta su llegada al laboratorio.

Para el análisis microbiológico el muestreo se rige por la norma ISO 5667/3: 94. Las muestras se colectan en envases de vidrios color ámbar con capacidad de 120 mL y refrigeradas durante su arribo al laboratorio.

2.3.1 Determinación analítica

Las muestras se procesan en el Laboratorio de Monitoreo Ambiental perteneciente al Centro de Servicios Ambientales de Matanzas (CSAM) situado en la Universidad de Matanzas, Sede “Camilo Cienfuegos”.

El análisis físico-químico y microbiológico de las muestras de agua residual se realizan según el *Standard Methods of Analysis of Water and Wastewater* (AWWA APHA, WPCP, 2005).

Análisis físico-químico de las muestras del agua residual

Los parámetros de pH, Conductividad eléctrica (CE), Sales totales disueltas (STD), Salinidad y Temperatura se obtienen mediante la lectura directa en el equipo Sondas multiparamétricas marca HANNA.

- ❖ Demanda Química de Oxígeno (DQO): se empleó el método de oxidación con permanganato de potasio en medio alcalino, se determina el exceso de oxidante sin reaccionar por volumetría con solución estandarizada de tiosulfato de sodio.
- ❖ Nitrógenos de Nitratos (N-NO₃): los nitratos son reducidos a nitrito por el sulfato de hidracina en un medio alcalino en presencia de trazas de cobre como catalizador de la reducción. El ión nitrato en medio alcalino se reduce a nitrito con un potencial normal de reducción de 0,01 V. Las absorbancias de cada muestra se determinaron en espectrofotómetro a una longitud de onda de 545 nm y con empleo de un blanco de turbidez.

- ❖ Nitrógenos de Amonio (N-NH₄): en un medio alcalino el amonio presente en las muestras reacciona con el hipoclorito de sodio formando la monocloroamina, que en presencia de fenol y con el empleo del ión nitroprusiato como catalizador se obtiene el indofenol azul. Una vez formado el complejo este cuantifica la cantidad de ión amonio presente en la muestra mediante la lectura de las absorbancias de cada una determinada en espectrofotómetro a una longitud de onda de 630 nm.
- ❖ Fósforo inorgánico (P-PO₄): el fosfato presente en el agua, reacciona con el molibdato y reducido por el ácido ascórbico, con la formación del complejo azul de molibdeno. Las absorbancias de cada muestra se determinaron en espectrofotómetro a una longitud de onda de 882 nm y con empleo de un blanco de turbidez.
- ❖ Fósforo Total (PT): los compuestos de fósforo presentes en las muestras son oxidados con peroxidisulfato a fosfato o fósforo inorgánico cuantificándose de igual manera el molibdato y reducido por el ácido ascórbico, con la formación del complejo azul de molibdeno. Las absorbancias de cada muestra se determinaron en espectrofotómetro a una longitud de onda de 882 nm y sin la presencia de blancos de turbidez.

Análisis microbiológicos de las muestras del agua residual

Los indicadores microbiológicos a determinar son los Coliformes Totales (CT) y Coliformes Fecales o Termotolerantes (CF) mediante la técnica de fermentación en tubos múltiples, donde se emplean series de 5 tubos de acuerdo a la metodología definida en AWWA APHA, WPCP, (2005).

Para la confirmación de la presencia de CT se utiliza caldo Lactosado y caldo Bilis Verde Brillante respectivamente y para la confirmación de CF se emplea caldo EC. Los resultados se enumeran mediante el Número Más Probable (NMP) por 100 mL.

2.4 Características de los microorganismos eficientes empleados en la investigación

En la investigación se emplean microorganismos eficientes obtenidos en la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (**Anexo 6**)

correspondientes a microorganismos nativos que se identifican como bioproducto artesanal IH-plus.

En el **Capítulo 3** se exponen específicamente las características de dicho producto.

2.5 Evaluación del empleo de microorganismos eficientes en las aguas residuales procedentes de la planta en estudio en la etapa de decantación secundaria

En el estudio del empleo de los microorganismos eficientes (ME) en la etapa de sedimentación escala de laboratorio se analizan los sobrenadantes de cada experimento de igual manera que se realizó para las muestras aguas residuales procedentes del tanque de aireación. Los análisis físicos–químicos y microbiológicos fueron determinados por los mismos procedimientos analíticos.

2.5.1 Diseño y montaje de experimentos

El diseño de experimentos se realiza mediante el modelo de Diseño Compuesto Central (DCC). Las variables principales son; tiempo de retención (TRH) hidráulico en horas en el decantador secundario y dosis de microorganismos eficientes (ME). El tiempo de retención hidráulico en el decantador secundario es de 6,28 horas. Existen numerosos estudios en países como Japón, Colombia y Perú, donde se emplean los ME en dosis diferenciadas para el tratamiento de aguas residuales de diversas procedencias. Las dosis de ME a emplear en la investigación van desde 0,5 a 1,0 mL seleccionados en base a resultados obtenidos por Toc, (2012); Cardona y García, (2008) y Ficha Técnica de EM, (2015). Se utiliza para el montaje de los experimentos 1000 mL de agua residual o licor nitrificado.

El experimento se realiza con la simulación del proceso de decantación secundaria que ocurre en la planta en estudio, se utilizan probetas de 1000 mL cada una donde se agrega el agua residual y se añade la dosis de EM y el TRH indicado de acuerdo a lo obtenido en el diseño de la investigación. Al concluir se realizan los análisis correspondientes al agua residual tratada y los resultados obtenidos se muestran en el **Capítulo 3**.

En la evaluación de cada uno de los experimentos realizados se incluye la caracterización estadística de los parámetros ambientales del agua residual tratada y se evalúa respecto a la normativa para el vertimiento a zonas costeras NC 521: 2007. Esta norma regula los requisitos para el vertimiento de aguas residuales generadas por actividades socio-económicas a la zona costera y aguas marinas y tiene como objetivo prevenir la contaminación de los ecosistemas marinos y marinos costeros. En la misma se establece una clasificación cualitativa de los cuerpos receptores marinos donde se tiene en cuenta las características de los ecosistemas y el uso socio-económico. La zona costera donde se vierten los efluentes residuales procedentes del sistema de tratamiento “Las Conchas”, clasifica según sus diferentes usos en: Clase B: Áreas marinas dedicadas al baño y donde se realizan actividades recreativas en que las personas entren en contacto con el agua, Clase C: Áreas marinas donde se desarrolla la pesca, Clase E: Áreas marinas donde se desarrolla la actividad marítimo portuaria y Clase F: Áreas marinas para la navegación y otros usos. En el **Anexo 7** se muestra Tabla extraída de la NC 521: 2007, con los Límites Máximos Permisibles para el vertimiento de aguas residuales a zonas costeras.

2.5.2 Determinación de los sólidos sedimentables y lodos generados

Para la determinación del volumen de sólidos sedimentables se toma una muestra del agua residual en una probeta graduada de 1 litro, y después de la mezcla inicial, se deja reposar durante el TRH con la dosis de ME que indique el número de experimento. La velocidad de sedimentación de las partículas individuales dependerá solamente de su forma, tamaño (diámetro) y densidad. Una vez concluido el TRH de cada experimento se realiza una lectura para determinar el volumen de sólidos sedimentados, posteriormente son filtrados para obtener las muestras de lodos.

Las muestras de lodos seleccionadas para el análisis fueron sometidas a un proceso de secado al aire libre y se molinaron hasta obtener por el proceso de tamizado un tamaño de partículas entre 0,25 mm y 2 mm.

La caracterización incluyó solamente los análisis físicos donde se determinaron: las unidades de pH donde se empleó un pH-metro marca HANNA, para lecturas de 0,1 unidades, con electrodo de vidrio y sensor de

temperatura y se determinó por el método de pérdida de peso por ignición a 550 °C en mufla durante 3 horas el contenido de cenizas.

La fracción de Materia orgánica (MO) se calculó por la ecuación (2.1):

$$MO = 100 - C. \quad (2.1)$$

Donde:

MO: materia orgánica (%)

C: contenido de cenizas (%)

2.5.3 Determinación de la eficiencia de remoción

En el sistema de tratamiento en estudio, la evaluación se realiza mediante el cálculo de la eficiencia de remoción (ε) (MOPT, 1991; Menéndez y Pérez, 2007) que no es más que la expresión de la concentración contaminante y se obtiene según la ecuación (2.2):

$$\varepsilon = S_0 - \frac{S}{S_0} \quad (2.2)$$

Donde:

S_0 : concentración del contaminante en el afluente.

S: concentración del contaminante en el efluente.

Se selecciona como parámetros de referencia la DQO, Nitrógeno Total Inorgánico (NTI), Fósforo Total (PT) y el contenido de CF debido al grado de contaminación del residual, además de ser parámetros que contemplan las normas cubanas para el vertimiento de aguas residuales en zonas costeras y aguas marinas (NC 521: 2007).

2.5.4 Procesamiento estadístico

Para el procesamiento estadístico de los datos se emplea el programa *STATGRAPHICS Plus 5.3* para Windows, donde se establecen parámetros descriptivos como la media muestral (\bar{X}), la desviación típica muestral (S) y el coeficiente de variación (CV). Conjuntamente se analizan los Coeficientes de Asimetría y el Coeficiente de Curtosis para comprobar la distribución normal de los datos obtenidos.

Basado en los resultados que aporte el cálculo de la eficiencia de remoción referida a las principales variables respuestas, a través del programa estadístico *STATGRAPHICS PLUS 5.3* para Windows se obtienen los principales índices descriptivos para analizar la influencia de las variables de diseño sobre las variables respuestas mediante el diagrama de Pareto, y de esta manera optimizar dichos experimentos.

De acuerdo a lo antes planteado se propone una modificación tecnológica con su posterior cálculo económico de costo de inversión. Todo esto para fundamentar el empleo ME en la etapa de decantación secundaria perteneciente al sistema de tratamiento de aguas residuales por lodos activados “Las Conchas”.

2.6 Propuesta de modificación tecnológica

Para mejorar la eficiencia de remoción microbiológica en la etapa de decantación secundaria perteneciente a la planta en estudio, se propone una reforma tecnológica que permita introducir el uso de microorganismos eficientes.

La propuesta consiste en diseñar un tanque de almacenamiento del ME correspondiente, con su adecuado sistema de tuberías, válvulas de entrada y salida, y una bomba. La selección del equipamiento se determina de acuerdo a los parámetros que se describen a continuación.

Para el diseño del tanque se calculan sus dimensiones mediante la ecuación (2.3), su volumen depende del flujo de ME a emplear. La selección del material del tanque, las tuberías, las válvulas y demás accesorios se realizan según las características del ME ha emplear.

$$V = \frac{\pi d^2}{4} * h \quad (2.3)$$

Donde:

V : volumen (m^3)

d : diámetro (m)

h : altura (m)

En la selección de bombas se toman los siguientes criterios utilizados por Rosabal y Garcell, (2006), $q_{\text{bomba}} \geq q_{\text{sistema}}$, $H_{\text{bomba}} \geq H_{\text{sistema}}$, $NPSH_{\text{bomba}} \leq NPSH_{\text{sistema}}$.

$$q_{\text{bomba}} \geq q_{\text{sistema}}$$

Para cumplir con este criterio de selección, la bomba debe ser capaz de impulsar un flujo superior o igual al del sistema.

$$H_{\text{bomba}} \geq H_{\text{sistema}}$$

Para calcular la carga de operación del sistema se utiliza la siguiente metodología:

Determinar el diámetro de tuberías

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot q}{\pi \cdot v}} \quad (2.4)$$

Donde:

D : diámetro (m)

q : flujo volumétrico (m^3/s)

v : velocidad (m/s)

Para líquidos poco viscosos como es el caso del ME a utilizar en el sistema, se utilizan valores de velocidades de succión y descarga de la bomba entre 0,3 - 0,9 m/s y 1,2 - 3,0 m/s respectivamente, recomendadas por Mc Cabe, *et al.*, (1991).

Los valores de velocidades escogidos para la succión y descarga son 0,3 m/s y 1,2 m/s respectivamente y se elige el mayor flujo que se pueda bombear al sistema. De esta manera se obtienen los diámetros y con ellos en la Tabla 10 (Rosabal y Garcell, 2006) se determina las propiedades de las tuberías.

Cálculo de las velocidades.

$$v = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot D_t^2} \quad (2.5)$$

Donde:

D_i : diámetro interno (m)

Las velocidades se calculan a partir de los diámetros internos para comprobar que estos se encuentren dentro del intervalo del criterio.

Finalmente se determina la carga de operación del sistema por la expresión del balance de energía mecánica (2.6) de acuerdo a la metodología a seguir.

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho * g} + \frac{\alpha_1 * v_1^2}{2 * g} + H_b = Z_2 + \frac{P_2}{\rho * g} + \frac{\alpha_2 * v_2^2}{2 * g} + h_f \quad (2.6)$$

Donde:

Z_1 y Z_2 : altura de los puntos de referencia (m)

P_1 y P_2 : presión de succión y descarga (Pa)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

g : gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

α : factor de corrección de la energía cinética

v_1 y v_2 : velocidad en los puntos (m/s)

H_b : carga del sistema (m)

h_f : pérdidas de carga por fricción

La **Tabla 2.2** muestra las propiedades físicas del ME a la temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 2.2 Propiedades físicas del ME.

Parámetros	Unidades de medida	Cantidad
Densidad	kg/m^3	1005,3
Viscosidad cinemática	Pa*s	0,99E-03
Presión de vapor	Pa	3480,0

Los valores de velocidades, alturas y presiones están en función de donde se sitúen los puntos de referencia en el esquema de diseño del sistema adicional de introducción de microorganismos eficientes.

Calculo del factor de corrección de la energía cinética. Se determina en base al número de Reynolds.

$$Re = \frac{D_i * v * \rho}{\mu} \quad (2.7)$$

Donde:

Re : número de Reynolds

μ : viscosidad cinemática (m^2/s)

Para valores de $Re < 2100$ se considera régimen de flujo laminar y $\alpha=2$

Para valores de $Re > 4000$ se considera régimen de flujo turbulento y $\alpha=1$

Determinación de las pérdidas de carga por fricción.

$$h_{f \text{ totales}} = h_{f \text{ tuberías}} + h_{f \text{ accesorios}} \quad (2.8)$$

Cálculo de las pérdidas de carga por fricción en las tuberías.

$$h_{f \text{ tuberías}} = f * \frac{L}{D_i} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (2.9)$$

Donde:

f : factor de fricción

L : longitud de la tubería (m)

El factor de fricción depende del número de Reynolds. Si el régimen de flujo es laminar:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.10)$$

Si el régimen de flujo es turbulento:

$$\varepsilon = \frac{e}{D_i} \quad (2.11)$$

Donde:

ε : rugosidad relativa

e : rugosidad absoluta (m) en dependencia del tipo de material

Cálculo de las pérdidas de carga por fricción en los accesorios.

$$h_{f \text{ accesorios}} = \frac{K * v^2}{2 * g} \quad (2.12)$$

Donde:

K : coeficiente de resistencia del accesorio

El coeficiente de resistencia también se determina en función del número de Reynolds. Si el régimen de flujo es laminar se busca en la figura 3.24 página 106 y si es turbulento se localiza en la Tabla 3.1 página 102 ambos en el Rosabal y Garcell, (2006).

$$NPSH_{\text{ bomba}} \leq NPSH_{\text{ sistema}}$$

Este último criterio de selección de la bomba está relacionado con el fenómeno de cavitación. Es necesario evitar que este fenómeno ocurra para impedir el mal funcionamiento de la misma por lo que resulta necesario verificar si cavita o no para un determinado fluido antes de realizar la compra.

$NPSH_{\text{bomba}} = f(q, \text{rpm})$, significa que la carga neta de succión positiva es una función del flujo volumétrico y de la frecuencia de movimiento del impelente.

$$NPSH_{\text{sistema}} = \frac{P_e - P_v}{\rho * g} \quad (2.13)$$

Donde:

P_e : presión de entrada a la bomba (Pa)

P_v : presión de vapor (Pa)

Los resultados de las dimensiones del tanque, así como la selección de la bomba y accesorios se muestran en el **Capítulo 3**.

2.7 Costo de inversión de la modificación tecnológica

En función de la modificación tecnológica propuesta para la etapa de decantación secundaria, se realiza un análisis económico a partir del costo de inversión mediante la estimación de los costos de adquisición de los equipos y accesorios necesarios para el almacenamiento, distribución, y dosificación de la entrada al decantador circular del ME.

Para la determinación del costo de inversión se utiliza el programa CapCost 2008 el cual realiza una estimación del costo de adquisición de las bombas y los tanques propuestos, además de los costos de traslado, instalación, movimiento de tierra, tuberías, tendidos eléctricos y accesorios. En la determinación de los costos de los tramos de tubería se emplea los catálogos de costo de Columbia Pipe, (2006 – 2008).

Debido a que en ambos casos los costos de los equipos están desactualizados es necesario realizar una actualización mediante la expresión (2.14).

$$C2 = C1 * \frac{I2}{I1} \quad (2.14)$$

Donde:

$C2$: costo del equipo actualizado

$C1$: costo del equipo en el año 2002

$I2$: índice de costo del equipo actualizado

I1: índice de costo del equipo en el año 2002

Después de actualizados los costos de adquisición de los equipos, se calcula el costo de la adquisición del equipamiento correspondiente a la propuesta de modificación tecnológica en la planta en estudio por la expresión (2.15).

$$E = (C_{tanque}) + (C_{bomba}) + (C_{tuberías}) + (C_{accesorios}) \quad (2.15)$$

Donde:

E : costo de la adquisición del equipamiento

Posteriormente al cálculo del costo de la adquisición del equipamiento se realiza la metodología propuesta por Brizuela, (1987), mediante el criterio del método de Lang. Dicho método consiste en la estimación de los costos de inversión a partir del costo de su equipamiento principal, mediante la expresión (2.16) para industrias que procesan fluidos.

$$C = 4,74 * E \quad (2.16)$$

Donde:

C : costo de inversión del equipamiento

Para mejores resultados, al costo de inversión del equipamiento a instalar en la planta se debe agregar el costo de la compra de la materia prima, o sea, el volumen de microorganismos eficientes a emplear. Los resultados obtenidos se muestran en el **Capítulo 3**.

2.8 Conclusiones parciales del capítulo

1. Se describe el proceso tecnológico de la PTR “Las Conchas” que consta de tres etapas: pretratamiento, tratamiento secundario y tratamiento terciario.
2. Se detallan los métodos estandarizados para aguas residuales que permiten conocer la composición físico-química y microbiológica de las aguas residuales estudiadas.

3. Para el diseño de experimento se utiliza el modelo de Diseño Compuesto Central (DCC), donde se utiliza el programa estadístico *STATGRAPHICS Plus 5.3* para Windows para obtener un óptimo y calcular la eficiencia de remoción en función de los principales contaminantes.
4. Se describe la metodología utilizada para realizar la propuesta de modificación tecnológica en la presente investigación, así como la valoración económica de la misma.

Capítulo 3 Análisis de los resultados

En el actual capítulo se presentan los resultados obtenidos de los análisis físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales procedentes del reactor aerobio perteneciente al sistema por lodos activados “Las Conchas”, así como los obtenidos en la experimentación a partir del empleo de microorganismos eficientes en la etapa de sedimentación secundaria y de la propuesta de modificación tecnológica para la implementación del uso de EM en el proceso.

3.1 Resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales pertenecientes a la salida del tanque de aireación del sistema por lodos activados “Las Conchas”

En la **Tabla 3.1** se referencian los resultados en los análisis físico-químico y microbiológico obtenidos en las corridas experimentales para las muestras a la salida del reactor aerobio de la PTR “Las Conchas” en el periodo de estudio.

Se realiza una comprobación estadística de cada uno de los datos obtenidos de las variables o parámetros de estudio con el objetivo de determinar si cumplen o no con una distribución normal, a través de los Coeficientes de Asimetría (C.A) y de Curtosis (C.C). Se puede comprobar que todas las variables analizadas presentan una distribución normal, puesto que los coeficientes antes mencionados cumplen con el rango establecido de -2 y +2.

Después de comprobar la normalidad de los datos se realiza la caracterización estadística de cada variable, donde se determinan los parámetros descriptivos como: la media muestral (\bar{X}), la desviación típica muestral (S) y el coeficiente de variación (C.V). Se observa que existen coeficientes de variación muy elevados, esto puede estar influenciado por la presencia de datos desviados grandemente del grupo de resultados normales de las observaciones en las muestras analizadas. Es importante tener en cuenta que según Pujol y Lienard, (1990) y Colectivo de Autores, (2017) los datos de los análisis provenientes de procesos biológicos presentan gran dispersión dentro de sus respectivos rangos. Resultados similares fueron obtenidos por Martínez, (2005) y Rodríguez, (2016) en las plantas de tratamiento Sol Palmeras e Hicacos respectivamente, ambas del polo turístico de Varadero.

Tabla 3.1 Composición físico-química y microbiológica de muestras a la salida del reactor aerobio del sistema en estudio.

Corridas	Variables											
	pH	CE	STD	Salinidad	Temp.	DQO	N-NO ₃ +NO ₂	N-NH ₄	P- PO ₄	P- P.T	CT	CF
Unidades	Unidades de pH	µS/cm	mg/L	ups	°C	mg/L					NMP/100mL	
1	7,23	955,00	477,00	0,47	27,53	436,58	2,41	14,27	13,07	18,29	7,3E+05	3,6E+05
2	7,74	966,00	483,00	0,47	28,66	467,76	1,48	14,26	15,26	22,25	2,1E+08	2,1E+08
3	7,57	1032,00	516,00	0,51	28,68	530,13	1,76	14,60	30,81	44,00	7,3E+06	7,3E+06
4	7,51	980,00	494,00	0,48	27,43	465,24	1,65	13,99	20,56	25,14	6,4E+08	5,2E+07
5	7,21	954,00	478,00	0,47	28,50	596,30	1,28	14,36	14,25	41,20	3,7E+05	1,0E+05
6	7,46	1045,00	530,00	0,51	28,92	479,25	2,35	14,84	26,47	32,40	3,2E+08	1,9E+07
7	7,64	960,00	480,00	0,47	27,51	473,50	1,87	14,57	18,35	21,00	5,6E+08	2,1E+08
8	7,81	943,00	472,00	0,46	27,80	567,30	1,54	13,84	24,87	25,60	4,8E+08	3,0E+07
9	7,20	922,00	465,00	0,44	28,12	562,14	2,30	13,90	14,35	36,00	7,0E+06	4,5E+06
10	7,51	960,00	480,00	0,47	27,64	456,24	2,47	14,64	19,54	34,00	1,5E+06	3,4E+05
11	7,40	1020,00	520,00	0,50	26,98	487,64	1,74	14,36	25,23	44,00	3,4E+07	6,2E+06
12	7,20	1032,00	516,00	0,51	27,81	581,24	1,47	14,78	19,26	35,40	4,6E+08	2,6E+08
13	7,54	955,00	477,00	0,47	28,34	432,14	2,67	14,36	28,64	34,84	8,0E+05	5,7E+05
14	7,80	967,00	484,00	0,47	28,54	528,30	2,74	13,57	17,36	19,20	6,4E+06	6,1E+05
15	7,31	984,00	495,00	0,48	29,57	478,84	1,64	14,54	16,47	20,60	7,4E+08	8,6E+06
Resultados Estadísticos												
X	7,48	978,33	491,13	0,48	28,14	502,84	1,96	14,33	20,30	30,26	3,0E+07	6,7E+06
C.V	2,87	3,77	4,07	4,24	2,45	10,68	24,58	2,55	27,68	29,99	917,38	1357,48
S	0,21	36,87	19,98	0,02	0,69	53,70	0,48	0,36	5,62	9,07	2,8E+08	9,1E+07
C.A	0,13	0,66	0,80	0,33	0,33	0,49	0,35	-0,60	0,54	0,16	0,69	1,64
C.C	-1,17	-0,67	-0,67	-0,22	-0,24	-1,15	-1,41	-0,29	-0,92	-1,42	-1,20	1,09

La **Tabla 3.2** presenta un resumen de los valores y concentraciones promedio de los resultados obtenidos por la autora en los análisis físico-químico y microbiológico del agua residual a la salida del tanque de aireación o reactor aerobio. Se realiza una comparación de dichos resultados con los obtenidos en investigaciones previas como: resultados de los ensayos de laboratorio de la Empresa Aguas Varadero S.A en el periodo de 2018 - 2019 y con los obtenidos por Rodríguez, (2016) en la PTR Hicacos, la cual es similar a la del presente estudio. Como se puede apreciar existe similitud en los parámetros unidades de pH, temperatura y densidades de coliformes totales y fecales. Otros parámetros difieren de los reportados en la investigación puesto que, en los procesos de muestreo, análisis de laboratorio y el funcionamiento propio de cada sistema es diferente (Colectivo de autores, 2017).

Tabla 3.2 Comparación de los resultados obtenidos en los análisis físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales procedentes del reactor aerobio perteneciente a la PTR “Las Conchas” con otros autores.

Parámetros	Unidades de Medida	Autora, 2019	Laboratorio Aguas Varadero 2018-2019	Rodríguez, 2016
pH	Unidades de pH	7,51	7,38	7,56
CE	μS/cm	984,33	1008,00	2260,00
STD	mg/L	492,00	628,00	260,93
Salinidad	ups	0,48	–	1,00
Temperatura	°C	28,29	28	–
DQO	mg/L	852,36	–	428,01
P- PT	mg/L	28,18	–	–
P- PO ₄	mg/L	19,71	–	4,36
N- NO ₃	mg/L	3,58	–	–
N- NH ₄	mg/L	14,38	–	–
CT	NMP/100mL	1,0E+07	–	1,21E+06
CF	NMP/100mL	8,2E+06	–	3,66E+05

3.2 Características de los microorganismos eficientes empleados en la investigación

La Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (EPPFIH) ubicada en la provincia de Matanzas, en coordinación con el movimiento de agricultura orgánica de Costa Rica facilitó en el año 2004 la transferencia de la tecnología del Microben, muy similar al ME. Al transcurrir de los años la tecnología se ha mejorado mediante disímiles ajustes realizados para adecuarla a las condiciones cubanas. De esta manera surge el bioproducto artesanal IHplus en el cual se trabaja para emplearlo en diversos escenarios productivos estatales y cooperativos. Sobre la base del IHplus se genera un nuevo bioproducto con mejores potencialidades.

De acuerdo a estudios realizados en la EPPFIH se determina que dicho bioproducto es resultado de la fermentación anaerobia de microorganismos nativos que contiene bacterias aerobias y anaerobias, levaduras, hongos y lactobacilos, de origen natural, no manipulados genéticamente. Se caracteriza por ser un sólido de color carmelita oscuro y un olor agradable a vino. En la investigación se empleó un líquido fermentado de ME proporcionado por la EPPFIH con el correspondiente certificado de calidad del bioproducto. En el **Anexo 6** se muestran las características de este producto libre de patógenos con un pH menor de 3,5 y un conteo total de microorganismos representativos del producto expresados en UFC (Unidades Formadoras de Colonias).

3.3 Evaluación del empleo de microorganismos eficientes en las aguas residuales procedentes de la planta en estudio en la etapa de sedimentación secundaria

Los resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos obtenidos a escala de laboratorio a partir del empleo de microorganismos eficientes (ME) en la etapa de sedimentación secundaria se muestran en el **Anexo 8**. Se realiza una caracterización estadística de cada variable respuesta para cada experimento, donde se determinaron los parámetros descriptivos como: la media muestral (\bar{X}), la desviación típica muestral (S) y el coeficiente de variación (C.V). Se aprecia que existen coeficientes de variación muy elevados

para los parámetros relacionados con las concentraciones de fósforo y las densidades de coliformes, lo cual se justifica por la presencia de datos dentro de las observaciones en las muestras analizadas, que se desvían del grupo de resultados normales. Colectivo de Autores, (2017) plantean que la diversidad de datos que derivan de los análisis provenientes de muestras de agua, sobrenadantes, licores o lodos de los procesos de remoción biológica de carga contaminante presenta gran dispersión que es importante a tener en cuenta a la hora del diseño y funcionamiento del sistema.

En la **Figura 3.1** se muestran los valores de las unidades de pH en cada experimento, estos se reportan en el orden de las 7 unidades y se aprecia que existe poca variación en los resultados lo cual se corrobora estadísticamente con los CV calculados para este parámetro. Todos los valores para cada experimento cumplen con el rango de los límites máximos permisibles establecidos por la NC 521: 2007 para vertimientos en la zona costera, esta norma reporta valores entre 5,5-9,0 unidades de pH para las Clases A, C y E y entre 5,5-10,0 unidades de pH para la Clase F.

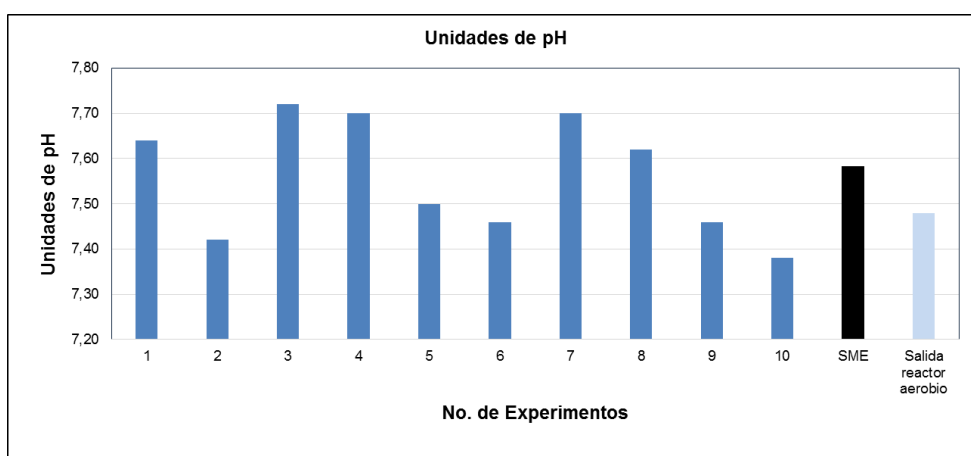


Figura 3.1 Valores de pH obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

Del análisis multifactorial se concluye que de los factores de estudio analizados es la dosis de ME la que presenta una influencia muy significativa sobre esta variable respuesta (Unidades de pH) demostrándose con los valores de probabilidad (*P- Value*) de (0,0482) inferiores a 0,05 (**Anexo 9**). Esto puede deberse a que los valores de pH del producto de ME son de inferiores a 4 y según Colectivo de autores, (2017) los procesos biológicos que emplean

organismos vivos, están sujetos a trastornos provocados por agentes inhibidores o tóxicos, lo cual requiere especial atención para garantizar que la eficiencia de los procesos ante la eventual presencia de estos agentes. La inhibición es causada por agentes químicos o físicos, tales como pH, temperatura, potencial de óxido reducción entre otros.

Los valores de temperatura representados en la **Figura 3.2** se encuentran entre 26,99 y 28,76 °C inferiores a 40°C como establece la NC 521:2007 para el vertimiento de residuales líquidos en la zona costera para todas las Clases. Los experimentos 5, 9 y 10 con TRH entre 3 y 4 horas reportan una disminución de los valores de temperatura con respecto a la muestra tomada a la salida del reactor aerobio y a el experimento sin ME, resultados que no se comportan de igual manera en los restantes experimentos, aunque en los resultados estadísticos los datos obtenidos no existen variaciones dadas por los CV calculados. Es el TRH el factor que influye significativamente sobre esta variable con valores de probabilidad (*P- Value*) de (0,0047) inferiores a 0,05 (**Anexo 9**). López *et al.*, (2017) plantea que una diferencia de temperatura significativa entre el agua en la superficie del sedimentador y el lodo en la parte inferior puede causar una inversión inesperada, lo que resulta en la flotación del lecho de lodos. Colectivo de autores, (2017) plantean que elevados TRH estimulan los procesos de desnitrificación en los sedimentadores secundarios al aumentar la temperatura y esto produce lodos flotantes.

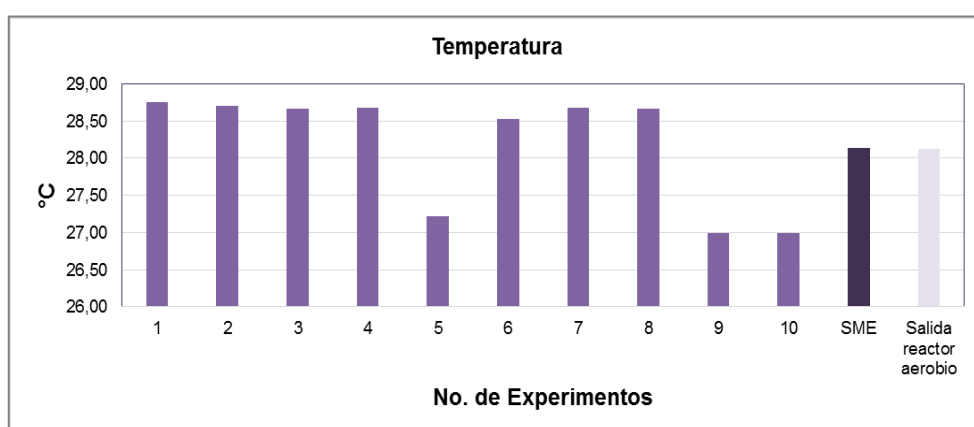


Figura 3.2 Valores de Temperatura obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

Los valores obtenidos de la concentración de materia orgánica expresada en DQO en cada uno de los experimentos se pueden apreciar en la **Figura 3.3**. Los experimentos 3 y 8 reportan valores por debajo de los 200 mg/L con una dosis de ME de 0,3 y 1,7 mg/L respectivamente y un TRH de 6 horas en ambos casos, aunque también es considerable la disminución de la DQO en los experimentos restantes, respecto al valor obtenido de dicho parámetro en la salida del reactor aerobio. La NC 521: 2007 establece que el límite máximo permisible para este parámetro para la Clase A es de 75 mg/L indicativo que no se cumple por ninguno de los experimentos, entre 75 y 300 mg/L para la Clase C rango donde los resultados de los experimentos cumplen y menor de 190 mg/L para la Clase E, donde solo lo cumplen los resultados de los experimentos 3 y 8 y menores de 300 mg/L para la Clase F, donde todas las salidas de los experimentos cumplen con este límite.

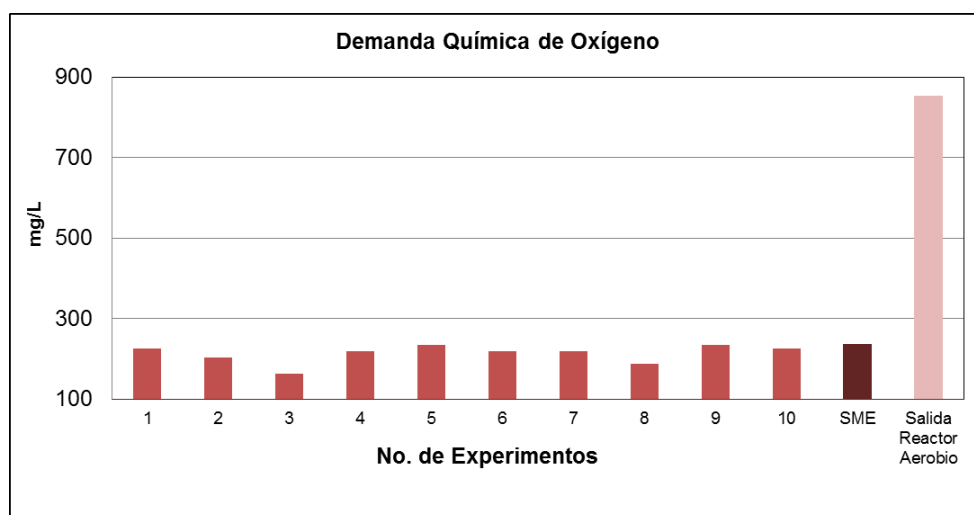


Figura 3.3 Valores de DQO obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

Todos los experimentos con la aplicación de los ME mostraron mejores resultados en los valores de DQO comparados a los que no se le aplicaron los ME. Con respecto a los valores obtenidos a la salida del reactor aerobio existe una disminución que oscila entre 688,44 y 618,48 mg/L. Según los resultados estadísticos las concentraciones de DQO obtenidas para cada experimento muestran poca estabilidad dada por los CV. Estos resultados vienen dados por la complejidad que presenta las determinaciones de la materia orgánica en los sistemas biológicos de remoción. Según Colectivo de autores, (2017) el término

de la DQO incluye tanto la materia no biodegradable como la biodegradable y según su solubilidad o su proporción de degradación, en solubles y no solubles.

Del análisis multifactorial que se muestra en el **Anexo 9** se concluye que ninguno de los factores de estudio analizados ejerce una influencia significativa sobre esta variable respuesta lo cual se corrobora con valores de probabilidad (*P- Value* superiores a 0,05) de 0,8866 para la dosis de ME y de 0,4715 para el TRH.

El Nitrógeno Total Inorgánico (NTI) se determina como la suma de los nitrógenos de nitrato y el nitrógeno amoniacal. Todos los resultados reportados en cada experimento muestran un comportamiento muy estable estadísticamente y se reflejan en la **Figura 3.4**. Las concentraciones medias de este parámetro en todos los experimentos fueron superiores a los 10 mg/L referido en la NC 521: 2007 para la Clase A e inferiores a los 20 mg/L establecidos por igual norma para las Clases C, E y F. Solo el experimento 3 muestra mayores concentraciones de este parámetro respecto a el experimento sin ME. En el proceso de sedimentación existe una remoción de los nitrógenos al comparar los resultados con la salida del reactor aerobio.

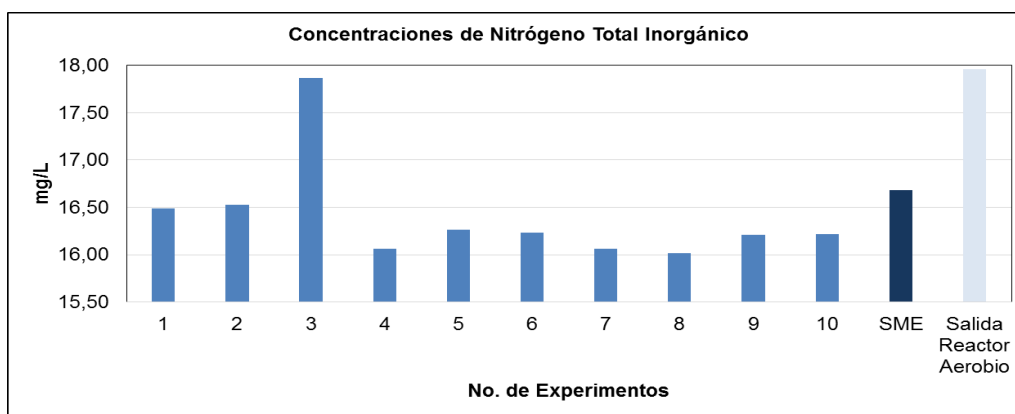


Figura 3.4 Valores de Nitrógeno Total Inorgánico obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

Al analizar la influencia de los factores de estudio a través del análisis multifactorial de determinó que no es significativa demostrada con valores de probabilidad (*P- Value* superiores a 0,05) de 0,1589 para la dosis de ME y de 0,7238 para el TRH (**Anexo 9**).

El fósforo (P) es el elemento clave a remover en las aguas residuales con el fin de limitar el crecimiento de plantas acuáticas y algas, y controlar el fenómeno de eutrofización. A diferencia del nitrógeno, el cual puede ser fijado de la atmósfera, la cual tiene un contenido de nitrógeno gas cercano al 80%, el fósforo sólo proviene de lo que se vierte a los sistemas acuáticos. Fuentes difusas de P como las que provienen de campos agrícolas son controladas de mejor manera mediante planes adecuados de fertilización, mientras que las fuentes puntuales de fósforo como las que provienen de plantas de tratamiento de aguas residuales pueden ser removidas mediante procesos químicos o biológicos (Colectivo de autores, 2017).

En el caso de las concentraciones de fósforo total la norma establece que residuales vertidos a la zona costera los valores deben ser inferiores a 5 mg/L para las Clases A y E, menores de 7 mg/L para la Clase C y menores de 10 mg/L para la Clase F. Los resultados de las concentraciones para cada uno de los experimentos se muestran en la **Figura 3.5**. Los 1, 2, 6 con dosis de ME de 0,5; 1,5 y 1 mL respectivamente y TRH entre 8 y 9 horas son los reportan mayores valores e incumplen con los límites fijados por la norma, el resto de los experimentos muestran concentraciones inferiores. Todos los resultados para este parámetro son inferiores a los obtenidos a la salida del reactor aerobio lo cual demuestra que existe una remoción en el proceso de sedimentación. Estadísticamente se reporta que este parámetro se comporta muy inestable.

Del análisis multifactorial que se muestra en el **Anexo 9** se concluye que de los factores de estudio analizados es el TRH el que ejerce una influencia muy significativa sobre esta variable respuesta lo cual se corrobora con el valor de probabilidad (*P- Value*) de 0,7633 (superior a 0,05) para la dosis de ME y de 0,0157 (inferior a 0,05) para el TRH.

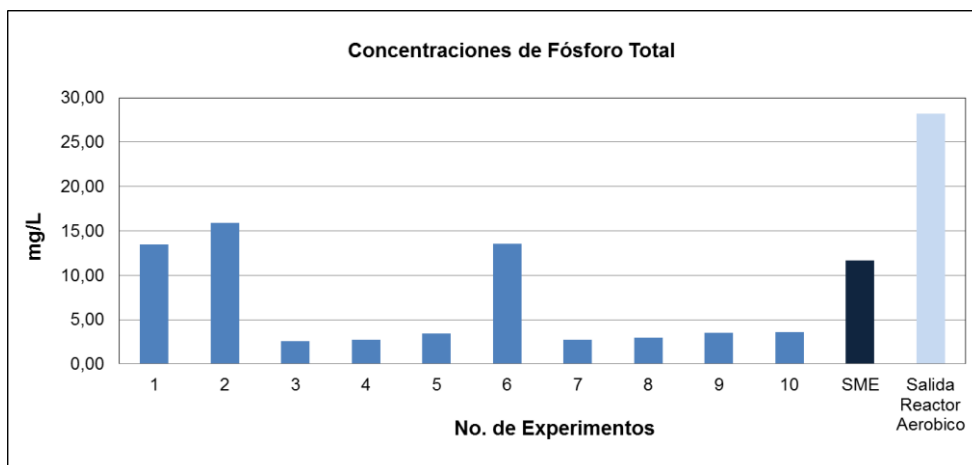


Figura 3.5 Valores de Fósforo Total obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

Las densidades de los coliformes fecales o termotolerantes reportadas en cada uno de los experimentos se muestran en la **Figura 3.6**. Las concentraciones exceden notablemente los valores establecidos por la norma para las diferentes Clases, de manera que no se cumplen con ninguno de los límites y rangos establecidos en la misma, no obstante, en comparación con el valor obtenido a la salida del reactor aerobio en la mayoría de los experimentos se logran valores inferiores al mismo, a excepción del experimento 2 con un resultado desfavorable.

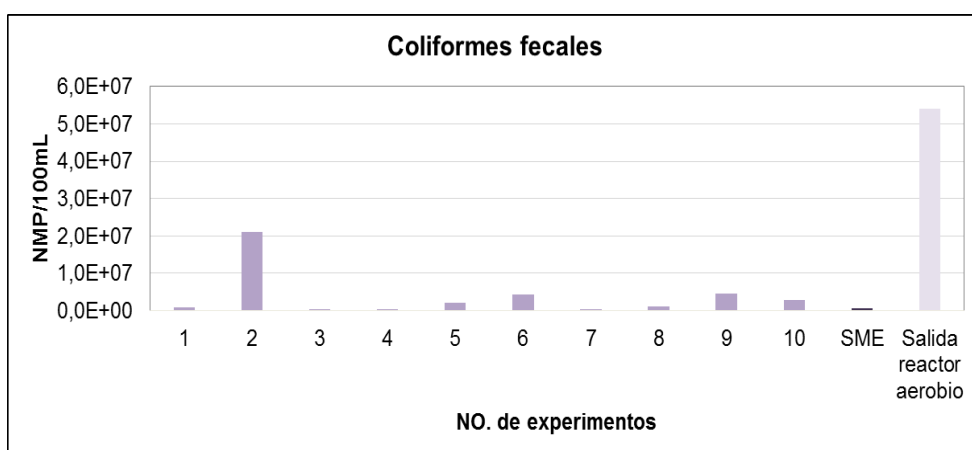


Figura 3.6 Valores del contenido de Coliformes fecales o termotolerantes obtenidos en los experimentos, comparados con los valores reportados en los análisis sin ME y a la salida del reactor aerobio.

En el **Anexo 9** se muestra la influencia de los factores de estudio a través del análisis multifactorial, esta concluyó que no es significativa demostrada con

valores de probabilidad (*P- Value* superiores a 0,05) de 0,2727 para la dosis de ME y de 0,3205 para el TRH.

De todas las determinaciones realizadas en la experimentación para los efluentes se relacionan parámetros que los mismos no están contemplados en la NC 521: 2007 como los referidos a la conductividad eléctrica (CE), salinidad, Sales Disueltas Totales (SDT), las concentraciones de fósforo inorgánico y las densidades de los coliformes totales. Los parámetros de CE, salinidad y SDT muestran un comportamiento estadístico estable con CV menores a 12. En otras PTR del polo turístico estos parámetros influyen dentro de los procesos biológicos de las mismas, y se debe a que los sistemas de re-bombes de las aguas residuales de los hoteles, presentan asentamientos y con ello la intrusión de aguas salinas procedentes del manto afectan el comportamiento de estos parámetros y otros como los niveles de cloruros estos resultados son mostrados por Malpica, (2018) y Rodríguez (2016).

Las concentraciones de fósforo inorgánico presentan una inestabilidad estadística al igual que las densidades de los coliformes totales y se reflejan en los resultados de las concentraciones de fósforo total y las densidades de coliformes fecales o termotolerantes respectivamente.

Al analizar la influencia de los factores de estudio: salinidad, Conductividad eléctrica (CE), Sales Disueltas totales (SDT) a través del análisis multifactorial de determinó que es el TRH el factor que influye significativamente sobre estas variables con valores de probabilidad (*P- Value*) de 0,0053 para la salinidad, 0,0088 para la CE y 0,0029 para las SDT todas inferiores a 0,05 (**Anexo 9**). La dosis de ME no presenta influencia significativa sobre las variables respuestas analizadas con valores de *P- Value* superiores a 0,05.

Del análisis multifactorial para las concentraciones de fósforo inorgánico, las cuales están incluidas en el análisis del fósforo total se concluye, que de los factores de estudio es el TRH el que ejerce una influencia muy significativa sobre esta variable respuesta, lo cual se corrobora con un valor de probabilidad (*P- Value*) de 0,0112 inferior a 0,05 (**Anexo 9**).

3.3.1 Determinación de los sólidos sedimentables y lodos generados

Los resultados de los análisis físico-químicos obtenidos a escala de laboratorio de los lodos generados a partir del empleo de microorganismos eficientes (ME) en la de sedimentación secundaria aparecen en el **Anexo 10**.

En los sistemas por lodos activados el parámetro que se controla no es la masa de lodos en el reactor a través de la medición directa de la concentración de lodos, sino a través del volumen sedimentado después de 30 minutos en un recipiente cilíndrico de 1 litro. Si el volumen sedimentado es mayor que un cierto valor, por ejemplo 450 mL/L, entonces el lodo se purga hasta que se obtenga nuevamente este valor. Esta metodología fue desarrollada con el fin de obviar la necesidad de medir directamente la concentración de lodos en el reactor, y de esta forma, la concentración en el reactor varía de acuerdo a la sedimentabilidad del lodo medida a través del Índice Volumétrico de Lodos (IVL) según plantean Colectivo de autores, (2017).

En la experimentación se determinó que la concentración de Sólidos Sedimentables en el Licor Mezclado (SSLM) (muestras de salida del reactor aerobio) osciló alrededor de los 2500 – 3000 g SSLM/m³, estos resultados se encuentran por debajo del valor reflejado en el Manual de Operaciones de la Planta que refiere que las concentraciones de SSLM deben de ser de 3065 g SSLM/m³. Esto puede deberse a las bajas cargas orgánicas que llegan a la planta por el nivel ocupacional de los hoteles. Martínez, (2005), refleja que los cálculos para el IVL (que se expresa en mL/g) se realizan por la siguiente ecuación:

$$IVL = \frac{SS_{30}}{\frac{X_t}{1000}} \quad (3.1)$$

Donde:

SS₃₀: Volumen de lodos después de sedimentar durante 30 minutos (mL).

X_t: Concentración inicial de sólidos suspendidos totales en la muestra (mg/L).

Diversos autores como Martínez, (2005) y Colectivo de autores, (2017) plantean que los valores típicos del IVL para lodos de buenas características de sedimentación con concentraciones entre 800 – 3500 mg/L están comprendidos entre 35 – 150 mL/g. Al realizar los cálculos el IVL para los experimentos se reportaron en el rango de 61 y 129 mL/g como se muestra en

la **Figura 3.7**, los resultados para este parámetro mostraron una inestabilidad o dispersión dentro de sus rangos referidos al elevado CV reportado. Los experimentos que mostraron mayor IVL fueron 1, 2 y 6 los cuales presentan mayores TRH. Estos resultados se comprueban con el análisis multifactorial que se muestra en el **Anexo 11** donde de los factores de estudio analizados es el TRH el que ejerce una influencia muy significativa sobre esta variable respuesta lo cual se corrobora con el valor de probabilidad (*P- Value* inferior a 0,05) de 0,0023.

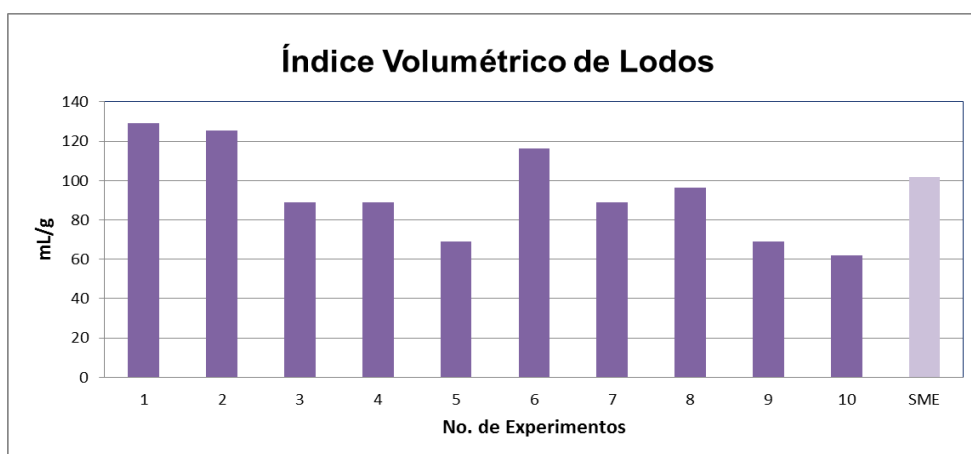


Figura 3.7 Valores del IVL en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

Según Ramalho, (2003) el volumen de sólidos sedimentables guarda estrecha relación con el IVL y los tiempos de retención hidráulicos en la operación unitaria de sedimentación. En la **Figura 3.8** aparece representado el volumen de sólidos sedimentables determinado para cada número de experimento, estos resultados mostraron un comportamiento estadísticamente estable con CV bajos o menores de 4. De estos valores se concluye que a mayor TRH mayor será el volumen de sólidos sedimentables como es el caso de los experimentos 1, 2 y 6, incluso con un volumen superior al reportado por el experimento SME.

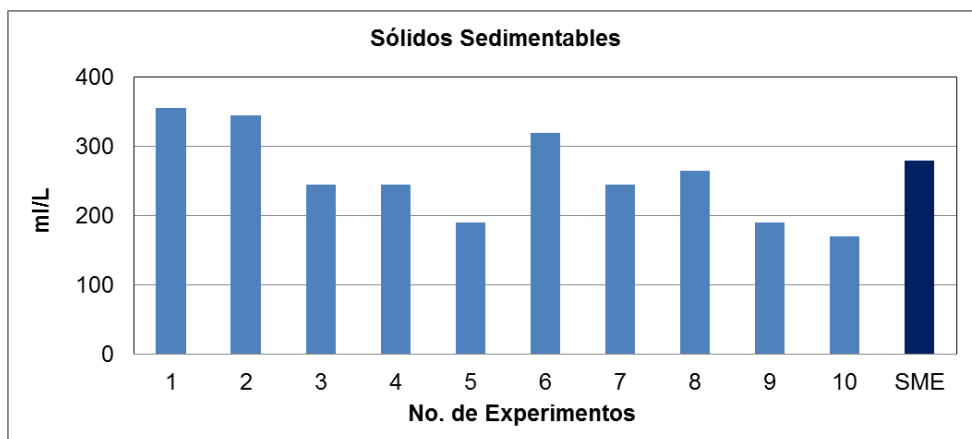


Figura 3.8 Valores de los sólidos sedimentables en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

Al tener en cuenta el volumen de sólidos sedimentados en la experimentación este presentó correspondencia con la cantidad en peso que se generó en los experimentos. En la **Figura 3.9** se muestra el comportamiento de las masas de lodos generados en los experimentos. Estos resultados mostraron un comportamiento estadístico muy inestable con elevados CV. Los experimentos que mostraron mayores masas son los que presentaron mayores TRH en la experimentación. Del análisis multifactorial se concluye que de los factores de estudio es el TRH el que presenta una influencia significativa sobre esta variable respuesta, con valores de probabilidad (*P- Value* inferior a 0,05) de 0,0071. La dosis de ME no es significativa sobre la masa de lodos generadas con valores de *P- Value* (0,8960) superiores a 0,05 **Anexo 11**.

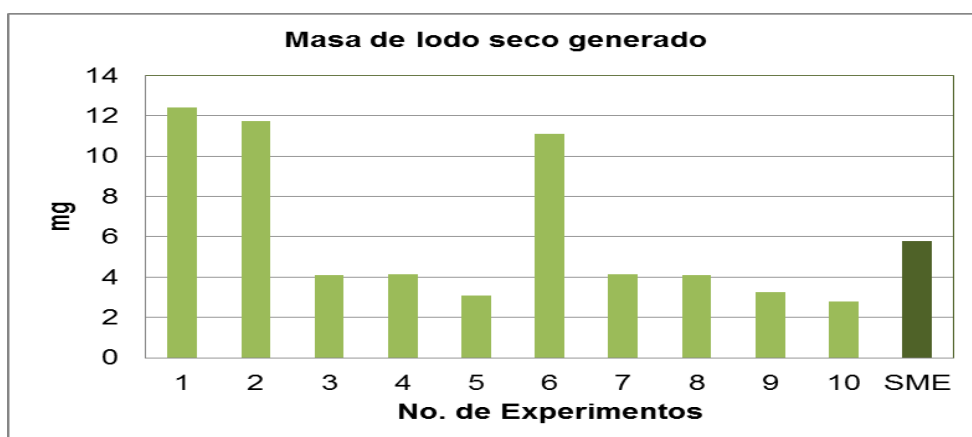


Figura 3.9 Valores de las masas de lodos secos generados en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

Los lodos que provienen de los sistemas de tratamiento de aguas residuales dependen en gran medida de su composición química y en especial, de la concentración de metales pesados. La presencia de determinadas sustancias por encima de ciertos límites puede hacer que los lodos no sean adecuados para ciertos usos o que se tengan que adoptar precauciones especiales en su posterior procesado (Ramalho, 2003).

Se realiza un estudio de las variaciones de parámetros como el pH y la concentración de cenizas y materia orgánica en los lodos obtenidos en la experimentación. Los lodos secos reportaron valores de pH con poca variación y muestran un comportamiento estadísticamente estable con CV menores de 4. Los valores de pH se reportan en el orden de las 6 unidades de pH como muestra la **Figura 3.10**. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por autores como De la Rubia *et al.*, (2008) que plantean en estudios de caracterización de un lodo procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales en España que los valores de pH oscilaron alrededor de las 6,2 unidades.

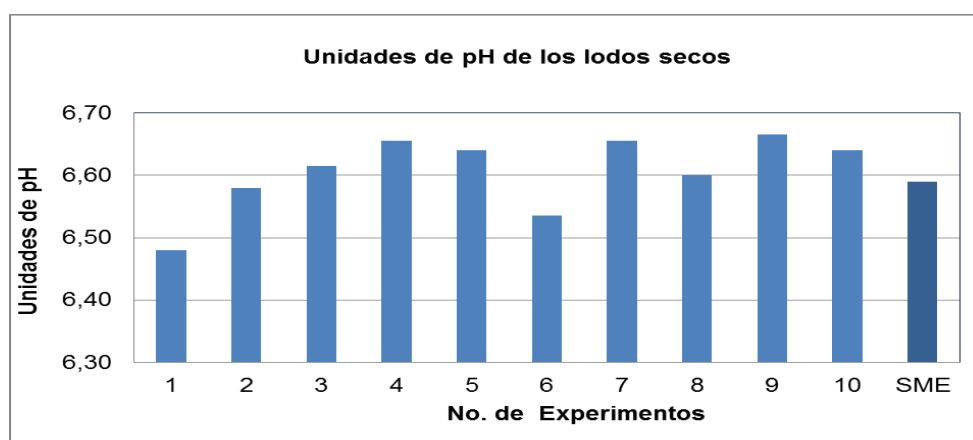


Figura 3.10 Valores de pH de lodos secos en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

El contenido de cenizas en los lodos secos procedentes de la experimentación aparece representado en la **Figura 3.11**, donde se puede apreciar valores muy bajos e inferiores al 4 % con una marcada inestabilidad estadística. De acuerdo con estos valores reportados podemos afirmar que el contenido de materia orgánica determinado más adelante alcanzará valores muy elevados por encima del 90 %.

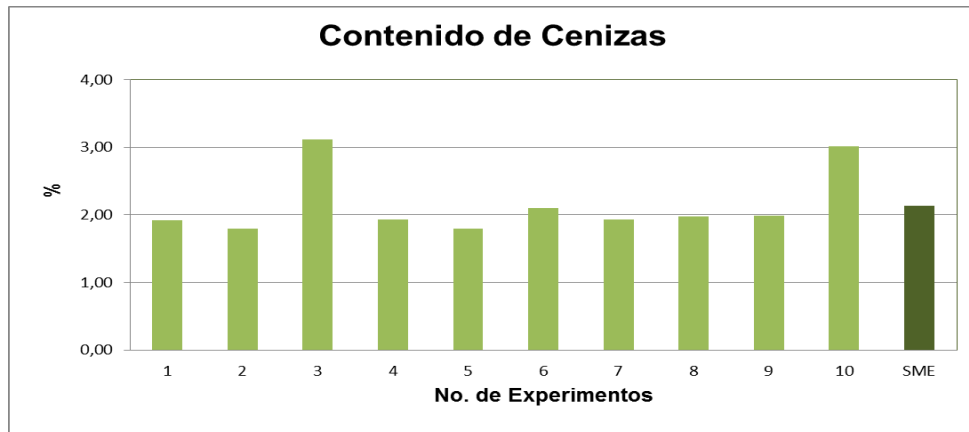


Figura 3.11 Concentración de Cenizas de los lodos secos en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

La concentración de materia orgánica obtenida por pérdida de peso por ignición en los lodos secos procedentes de la experimentación se muestra en la **Figura 3.12**. Los resultados arrojaron valores superiores a 96 % y mostraron una inestabilidad estadística reflejada en los CV con valores elevados. Los experimentos con menores valores son el 3 y 10, inferiores a los obtenidos en el experimento donde no se aplican los ME. Del análisis multifactorial que se muestra en el **Anexo 11** se concluye que ninguno de los factores de estudio analizados ejercen una influencia significativa sobre esta variable respuesta lo cual se corrobora con los valores de probabilidad (*P- Value*) de 0,2885 para la dosis de ME y de 0,4288 ambos superiores a 0,05.

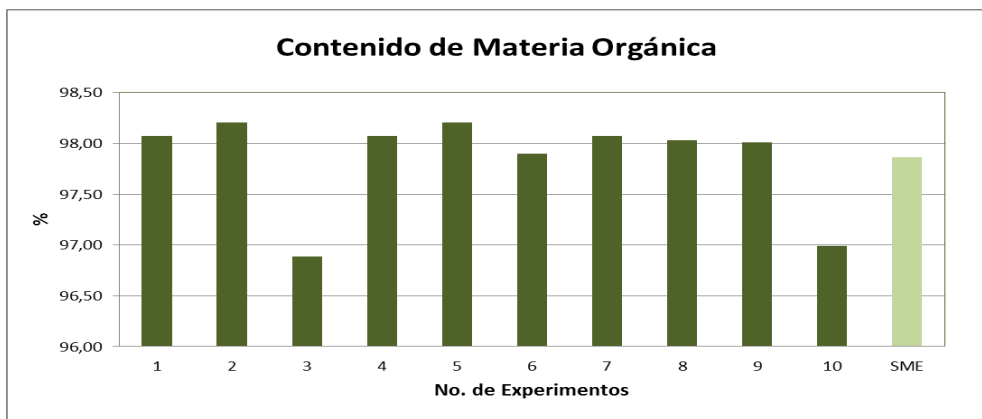


Figura 3.12 Concentración de Materia Orgánica de los lodos secos en los experimentos comparados con el valor del experimento SME.

Según criterio de autores como Álvarez, (2009) y Menéndez y Pérez, (2007), el contenido de materia orgánica de lodos procedentes de plantas de tratamiento

oscila entre 60 y 80 %. Otros autores como Valls *et al.*, (2008) encontraron concentraciones de materia orgánica en lodos de depuradoras de 44,7 %.

3.3.2 Determinación de la eficiencia de remoción

Según Menéndez y Pérez, (2007) la eficiencia de purificación o remoción en sistemas de tratamiento biológicos depende en cierta medida de la concentración de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual y es válida cuando se comparan los valores absolutos de DBO₅, DQO y sales solubles totales en el afluente y efluente. En la experimentación se realizan los cálculos para la etapa de sedimentación donde el afluente sería la salida del reactor aerobio y el efluente las muestras tomadas en el sobrenadante de cada experimento. Además de emplear otros valores absolutos como las concentraciones de fósforo, Nitrógeno Total Inorgánico (NTI) y densidades de coliformes fecales.

En la **Tabla 3.3** se muestra un resumen de las eficiencias de remoción expresada en porcentaje. La DQO muestra valores aceptables mayores de 70% destacándose el experimento 3 con un 80,79 %. La remoción en el PT y los CF fue más efectiva y superior al 90 % en varios experimentos, aunque existe presencia de algunos valores inferiores a los reportados por la DQO sin llegar a ser tan bajos comparados con los obtenidos en el NTI y a la determinación de los CF en el experimento 2.

Las eficiencias de remoción calculadas para los CF en cada experimento muestran valores > 90 % en especial para el experimento 3 y otros entre 86 y 93 %, sin embargo, De Buen, (2007), plantea que, aunque las cargas de remoción sean elevadas basta solo el 0,01 % para que los residuales líquidos vertidos representen un problema para los diversos usos del agua.

En el análisis multifactorial que se muestra en el **Anexo 12** se concluyó que el factor de estudio dosis de ME no presenta influencia significativa sobre ninguna de las variables respuestas analizadas (Eficiencias) con valores de *P- Value* superiores en todos los casos a 0,05. En el caso del otro factor de estudio el TRH solo ejerce influencia muy significativa sobre la eficiencia de remoción de fósforo total con valores de *P- Value* de 0,0153 (inferior a 0,05). De las interrelaciones solo se presenta influencia muy significativa para la variable de

eficiencia en base a CF entre la dosis de ME y el TRH y para el TRH al cuadrado, con valores de *P- Value* de 0,0241 y 0,0282 (Inferiores a 0,05). Para la variable de % de remoción en base a fósforo total la interrelación del TRH al cuadrado es la que ejerce una influencia significativa sobre la misma con valores de *P- Value* de 0,0717.

Tabla 3.3 Eficiencia de remoción expresada en porcentaje.

Diseño de experimentos			Eficiencias de Remoción (Expresadas en %)			
No de Experimento	Dosis de ME	TRH	DQO	NTI	PT	CF
1	0,5	8	73,48	0,00	55,52	86,42
2	1,5	8	76,22	0,00	47,44	0,00
3	0,3	6	80,79	0,00	91,60	96,57
4	1	6	74,39	1,40	90,94	93,58
5	1,5	4	72,56	0,17	88,74	70,15
6	1	9	74,39	0,37	55,09	35,82
7	1	6	74,39	1,40	90,94	93,58
8	1,7	6	78,05	1,67	90,33	82,09
9	0,5	4	72,56	0,49	88,42	31,34
10	1	3	73,48	0,43	88,07	56,72
SME			72,26	0,00	61,34	92,92

La autora considera que, al aumentar las eficiencias de remoción del sistema de tratamiento en estudio, que vierte sus aguas al mar del sur de la Península de Hicacos se contribuye a minimizar los impactos negativos sobre este ecosistema por disminución de cargas contaminantes y disminuye las dosis de hipoclorito de sodio a emplear en el tratamiento terciario.

3.3.3 Procesamiento estadístico

Se realiza el procesamiento de los resultados de la experimentación en el paquete estadístico *STATGRAPHICS Plus 5.0 para Windows*, con el objetivo de obtener a través de este programa las mejores condiciones que garanticen una mayor eficiencia en el proceso de depuración de las aguas residuales del sistema de tratamiento por lodos activados de “Las Conchas”.

Se utilizan los diagramas de Pareto el cual tiene como objetivo demostrar si las variables descritas en la experimentación (dosis de ME y Tiempo de Retención

Hidráulico) influyen significativamente o no sobre las variables respuestas seleccionadas que en este caso fueron las eficiencias de remoción de contaminantes en base a DQO, NTI, concentraciones de P-PT y densidades de CF.

En el **Anexo 13** se muestran los resultados obtenidos en los Diagramas de Pareto para cada variable respuesta referidas a las eficiencias en los efluentes determinados de cada experimento.

Para la eficiencia de remoción en base a la materia orgánica expresada en DQO influyen de manera positiva la interrelación de la dosis de lodo y el factor TRH, aunque ninguna de ellas influye significativamente sobre la misma. Para la eficiencia en base a las concentraciones de los Nitrógenos Totales Inorgánicos (NTI) influyen de manera positiva las interrelaciones entre los dos factores de estudio, pero al igual que en la DQO ninguna de ellas influye significativamente. Para la eficiencia en base a las concentraciones de fósforo total (PT) es el TRH el factor que ejerce una influencia negativa muy significativa sobre esta variable y en el caso de las densidades de coliformes fecales o termotolerantes (CF) son las interrelaciones entre los factores mL de ME y TRH la que ejerce una influencia negativa muy significativa sobre esta variable respuesta al igual que la interrelación del TRH cuadrado.

Para cada una de estas variables respuesta se determinaron los valores óptimos estadísticos para cada factor de estudio. Los resultados se muestran en la **Tabla 3.4**, en la misma se observa que los TRH se reportan inferiores a lo establecido en el Manual de Operaciones de la Planta (6,28 horas) excepto para la eficiencia en base a los CF. Por lo que se realiza un ajuste de los valores óptimos para cumplir con lo referido en el manual, resultados para esta variable muestra que la dosis de ME aumenta a 0,73.

Tabla 3.4 Resumen de los valores óptimos estadísticos referidos a los Factores de estudio A: Dosis de ME y B: TRH sobre las variables respuestas para las Eficiencias de remoción de contaminantes en el efluente.

Variabes respuestas	A: Dosis de ME (mL)	B: TRH (h)
Eficiencia DQO (%)	0,3	5,56
Eficiencia NTI (%)	1,15	5,88
Eficiencia P.T (%)	1,02	4,66
Eficiencia CF (%)	0,3	7,51

En las **Figuras 3.12** a la **3.15** se muestran las curvas de superficie respuesta con los resultados óptimos que garantiza los mayores valores de eficiencias en función de las variables.

Curvas de Superficies de Respuesta para las Eficiencias de Remoción de Contaminantes en los efluentes.

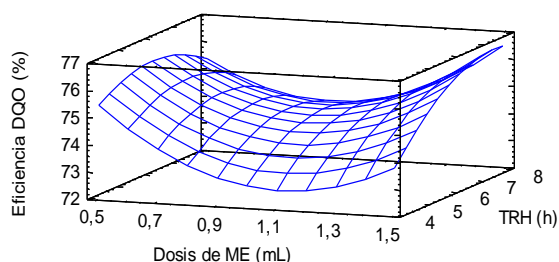


Figura 3.12 Eficiencia en base a DQO

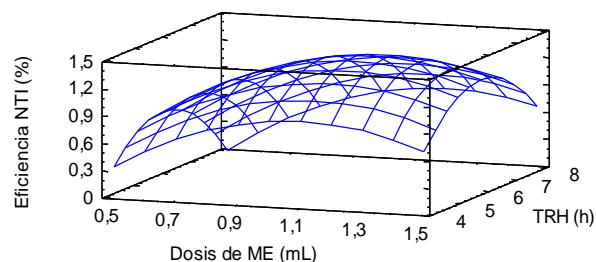


Figura 3.13 Eficiencia en base a NTI

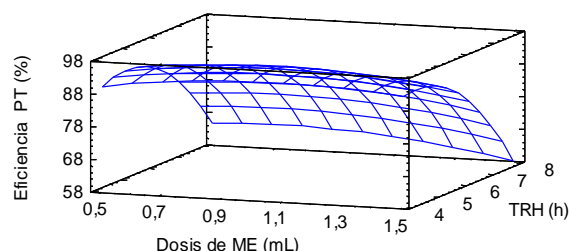


Figura 3.14 Eficiencia en base a PT

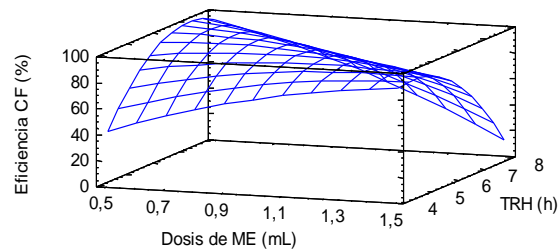


Figura 3.15 Eficiencia en base a CF

Al optimizar las variables del proceso bajo las mismas condiciones experimentales se obtienen valores óptimo diferentes de dosis de ME y TRH (**Tabla 3.4**). Con el objetivo de obtener los óptimos de los factores de estudio

(dosis de ME y TRH), que garanticen los máximos valores de eficiencias de remoción (en base a las variables respuesta: DQO, concentraciones de NTI y PT y las densidades de CF) se realiza una optimización multiobjetivo del sistema global, a partir de un modelo deseado que generalice y tenga en cuenta todas las variables involucradas en el proceso. Se tiene en cuenta criterios de optimización positivos (máximos) para los valores de eficiencia de remoción de contaminantes.

En la **Tabla 3.5** se muestra el informe de respuesta del proceso de optimización global donde los valores óptimos que se obtienen para la dosis de ME es de 0,3 mL y para el TRH es de 3 horas. En este estudio las cantidades de ME a aplicar son menores que los obtenidos por Rodríguez en el año 2016 para otra etapa depurativa en el proceso de tratamiento de aguas residuales y el TRH con valor de 3,0 horas es menor que el referido en el Manual de Operaciones de la Planta de 6,28 horas.

Tabla 3.5. Informe respuesta de optimización de la función global del sistema.

Microsoft Excel 14.0 Informe de respuestas
 Hoja de cálculo: [mariela.xls]Optimización
 Informe creado: 14/06/2019 14:29:50
 Resultado: Solver encontró una solución. Se cumplen todas las restricciones y condiciones óptimas.
 Motor de Solver
 Opciones de Solver

Celda objetivo (Máx.)

Celda	Nombre	Valor original	Valor final
\$J\$22	Deseabilidad	26,75327473	29,45356284

Celdas de variables

Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$J\$24	dosis Cte	1,5	0,3	Continuar
\$J\$25	tiempo Cte	6	3	Continuar

Restricciones

Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$J\$24	dosis Cte	0,3	\$J\$24	No vinculante	1,4
\$J\$24	dosis Cte	0,3	\$J\$24	Vinculante	0
\$J\$25	tiempo Cte	3	\$J\$25<=9	No vinculante	6
\$J\$25	tiempo Cte	3	\$J\$25>=3	Vinculante	0

En la **Figura 3.16** se muestra la curva de superficie de respuesta obtenida para la Función Objetivo Global.

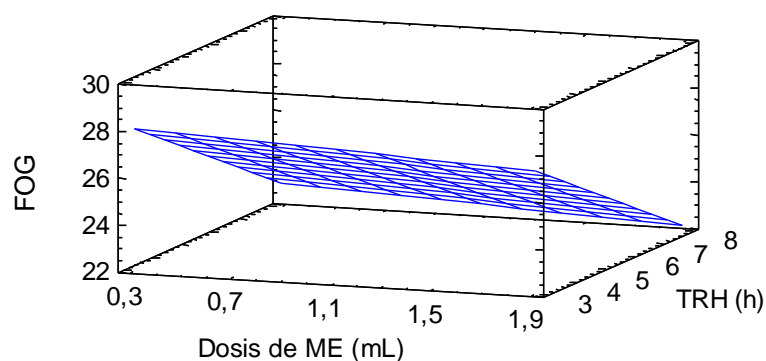


Figura 3.16 Curva de Superficie de Respuesta para la Función Objetivo Global.

3.4 Propuesta de modificación tecnológica

A partir de los resultados expuestos en el epígrafe 3.4 y la metodología explicada en el capítulo 2 se procede a realizar una propuesta de modificación tecnológica con la finalidad de insertar la tecnología de microorganismos eficientes en el sistema y mejorar la eficiencia de remoción microbiológica del efluente de la planta en estudio.

Una de las características de los ME es que presentan un pH relativamente ácido (3,2 - 3,8), por lo que se propone que los tanques, tuberías y demás accesorios para el almacenamiento y distribución del bioproducto a insertar en la planta en estudio sean de acero inoxidable, principalmente por la gran resistencia que ofrece este tipo de material a la corrosión.

Se propone la instalación de un tanque donde las dimensiones del mismo se determinan a partir del flujo de microorganismos eficientes a insertar en la etapa depurativa según los valores óptimos obtenidos de la experimentación. Como la dosis óptima de ME determinada fue de 0,3 mL por 1 L de agua o Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado (SSLM) se necesitan 4,5 m³ de ME. Las dimensiones se simplifican en: altura de 2,52 m; diámetro de 1,5 m y volumen de 5 m³. Este tanque debe ser cerrado sin presurización para evitar el deterioro del bioproducto de ME y estar bajo techo por ser fotosensible. Por lo que se tiene presente dentro del costo de inversión del tanque, el costo de obras civiles para la modificación tecnológica.

Para el tanque seleccionado se utiliza la instalación de dos válvulas de compuerta abierta (una en la succión y otra en descarga de la bomba) y dos

codos de 90⁰ estándar y además 10 metros totales de tuberías con un diámetro nominal de 1/8 de pulgadas, catálogo 40 en toda su extensión.

Para la aplicación de la propuesta de modificación tecnológica se necesita una bomba de tipo centrífuga (ITUR), que cumple con los criterios de selección descritos en el capítulo 2.

Se representa en la siguiente tabla los parámetros de la bomba seleccionada. La bomba se selecciona por cumplir con los criterios planteados en el capítulo 2.

Tabla 3.6 Parámetros de la bomba seleccionada.

Parámetros					
Bomba	Impelente	Eficiencia (%)	NPSH (m)	Potencia (KW)	Carga (m)
ITUR	Ø 139	45	5,8	2,15	7,0

3.5 Costo de inversión de la modificación tecnológica

Se determina el costo de inversión mediante el análisis de cada uno de sus componentes a partir de la estimación de los costos de adquisición de los equipos y elementos necesarios para la dosificación de los ME a la entrada del sedimentador secundario.

En la siguiente tabla se reflejan los resultados obtenidos del costo total de la adquisición del equipamiento para la propuesta de modificación tecnológica.

Tabla 3.7 Resultados del costo total de la adquisición del equipamiento.

Equipos seleccionados	Costo de adquisición en el 2002 (\$)	Costo actual de adquisición (\$)	Costo total de adquisición (\$)
Tanque	14558,00	34558,00	34558,00
Bomba centrífuga	14307,00	27307,00	27307,00
Tuberías	4460,69	9460,69	9460,69
Codo de 90 ⁰	106,00	156,00	312,00
Costo del equipamiento			339562,65

Basado en el criterio de Lang se calcula el costo de la inversión necesaria para la propuesta tecnológica, sin incluir los costos de adquisición de los microorganismos eficientes, y se obtiene como resultado \$ 339562,65.

En la provincia de Matanzas y fuera de esta existen diferentes instituciones que producen y comercializan el bioproducto a escala industrial con el empleo de la tecnología desarrollada por la Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey (donde se parte de un inóculo sólido), con grandes volúmenes de producción que oscilan entre 20 y 30 m³ al mes. Dentro de estas instituciones se encuentran el Centro Nacional para la Producción de Animales de Laboratorio (CENPALAB) y Empresa de Productos Biológicos y Farmacéuticos (LABIOFAM) en sus diferentes sucursales provinciales. En Matanzas, la Planta China, perteneciente a LABIOFAM comercializa este bioproducto y de manera general el precio oscila entre \$ 2 – 3 CUP que incluye la transportación.

La tecnología de los microorganismos eficientes mejora las características físico-química y microbiológica de los efluentes sobre todo las cargas de nutrientes y microbiana con la disminución de las concentraciones de fósforo y de coliformes fecales, con lo cual se puede reducir el uso de cloro en el tratamiento terciario. Reduce de olores ofensivos y gases nocivos en la etapa depurativa de la planta. Reducción de la producción de lodo por lo disminuye los costos de operación y mantenimiento del sistema. Poseen un efecto antagonista contra los patógenos.

Conclusiones

1. El uso de microorganismos eficientes en la etapa depurativa de sedimentación secundaria, mejora la eficiencia de remoción nutricional y microbiológica del sistema por lodos activados “Las Conchas” hasta alcanzar valores superiores al 90 %, por lo que queda validada la hipótesis.
2. El uso de los ME en la etapa depurativa del sistema de tratamiento de las aguas residuales de la PTR “Las Conchas” permite obtener lodos con buenas características de sedimentabilidad y con concentraciones de materia orgánica superiores a 96 %.
3. Se realiza una optimización multiobjetivo del sistema global determinado por STATGRAPHICS Plus 5.0 para Windows y el paquete de *Microsoft excel/ 2010* el cual arrojó que para la aplicación de la tecnología de los ME en el sedimentador en la etapa depurativa el tiempo de retención debe ser de 3 horas, se necesita introducir 0,30 mL de microorganismos eficientes por cada litro de agua residual o licor nitrificado a tratar en el sistema por lodos activados “Las Conchas”.
4. La propuesta de modificación tecnológica incluye un tanque de acero inoxidable de 1,5 m de diámetro y 2,52 m de altura, una bomba tipo ITUR con Ø 139 y una potencia de 2,15 KW, dos válvulas de compuerta abierta y 10,0 m de tuberías de diámetro nominal de 1/8 de pulgadas, catálogo 40 y 3 codos de 90° para la instalación de la propuesta.
5. El costo de inversión para la propuesta de modificación tecnológica es de \$ 339562,65.

Recomendaciones

1. Evaluar el uso de los microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales a mayor escala.
2. Determinar las variables que permitan el análisis económico de la modificación tecnológica propuesta.

Bibliografía

1. Álvarez, Y. (2009). Caracterización y propuesta de manejo de los residuos sólidos generados en las plantas de tratamiento por lodos activados de varadero. Matanzas. Tesis en opción al grado de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas.
2. Andreoli, C. V., Sperling, M., Fernandes, F. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series: Sludge Treatment and Disposal*. Vol. 6. New Delhi, India; Ediciones Aptara Inc. 241 p.
3. Arriols, E. (2018). Qué son las aguas residuales y cómo se clasifican. Ecología verde. España. Disponible en: <http://www.ecologiaverde.com>. Consulta febrero 2019.
4. AWWA APHA, WPCP. (2005). *Standard Methods of Analysis of Water and Wastewater*.
5. Azwita, N. (2009). *Keberkesanan Penggunaan Microorganisma Efektif (Effective Microorganism-E.M) Dalam Pemuliharaan Sungai Sebulung*. Universidad tecnológica Malaysia.
6. Barroso, (2010). Agua, medio ambiente, aguas residuales y su depuración. AEI. Aguas Varadero –Aguas Barcelona.
7. Bejerano, M. E., y Escobar, M. (2015). Eficiencia del uso de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales domésticas en una planta de Tratamiento de Agua Residual. Bogotá, Colombia. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental y Sanitario. Universidad de La Salle. 69 p.
8. Beltrán, T. R., y Campos, C. M. (2016). Influencia de los Microorganismos Eficaces sobre la calidad de agua lodo residual, Planta de Tratamiento de Jauja. Huancayo, Perú. Tesis para optar el título de Ingeniero Forestal y Ambiental. Universidad Nacional del Centro del Perú. 197 p.
9. Berland, J. y Cooper, P. (2001). *Guide Extensive Wastewater Treatment Processes*. Union Europea. ISBN 92-894-1690-4. 40 p.
10. BID. (2009). Manual Práctico de Uso de EM. Proyecto de Reducción de Pobreza y Mejora de las Condiciones Higiénicas de los Hogares de la Población Rural de Menores Recursos. 1era ed. Junio 2009 JO-10792 UR.

11. Brizuela, E. (1987). Aspectos fundamentales del diseño de plantas industriales. 1era edición, Tomo I. Ciudad de La Habana. Editorial ISPJAE.
12. Burgoa, F. (2015). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales con fotobiorreactor de microalgas. Valladolid. Tesis en opción al grado de ingeniero químico. Universidad de Valladolid. 149 p.
13. Cardona, J., y García, L. A. (2008). Evaluación de los microorganismos eficaces (EM®) sobre la calidad de un agua residual doméstica. Bogotá, Colombia. Tesis en opción a la carrera de Microbiología Industrial. Pontificia Universidad Javeriana. 152 p.
14. Colectivo de autores. (2016). *Experimental Methods in Wastewater Treatment*. Cap 2. 1ra ed. Reino unido: *IWA publishing*. ISBN: 9781780404752. p. 7-132.
15. Colectivo de autores. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. 1ra ed. Reino unido: *IWA publishing*. ISBN: 9781780409146. p. 57-96.
16. Columbia Pipe. (2006 - 2008). Catálogo de estimación de costos para tuberías y accesorios.
17. De Buen, C.R. (2007). Modelación de la dispersión de los contaminantes vertidos en playa norte, Veracruz México. Tesis de Grado. Universidad Nacional Autónoma de México, p. 100.
18. De la Rubia, A; Foster, T; Riau, V; Pérez, M. (2008). Optimización de la degradación anaerobia de lodos de EDAR mediante la operación en fases de temperatura. Tratamiento y valorización de fangos. III Jornadas Técnicas de Gestión de Sistemas de Saneamiento de Aguas Residuales. VOLUMEN DE PONENCIAS. Generalitat de Catalunya. Departamento de Medio Ambiente y Vivienda. Agencia Catalana del Agua.
19. Ficha Técnica de EM. (2015). Tratamiento de agua residual. Costa Rica.
20. Galvis, J., y Rivera, X. (2013). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Industriales (PTARI) de La empresa jugos HIT de la Ciudad de Pereira.

21. Gonzáles, L. Y., Junco, J. Z., Otero, M., Pardini, G. (2006). Monografía. Gestión de lodos de EDARs urbanas. Aprovechamiento como carbón activado.
22. Guyer, J. P. (2011). Introduction to Secondary Wastewater Treatment. Curso No: C04-022, Crédito: 4 PDH, California.
23. Higa, T., y Parr, J.F. (1994). *Beneficial and effective microorganisms for a sustainable agriculture and environment*. Atami, Japón: *International Nature Farming Research Center*.
24. ISO 5667/1:93. Part I *Guidance on the design sampling programmes*.
25. ISO 5667/2:93. Part II *Guidance sampling techniques*.
26. Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. ICIDCA Sobre los derivados de la caña de azúcar. Revista científica de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Vol. 40, No. 2, mayo-agosto 2006, p. 10-17, Cuba. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002> . Consulta abril 2019.
27. López, C. M., Fernández, I. y Guang, Ch. (2017). Tratamiento de aguas residuales para la reutilización del agua. [Consulta mayo 2019]. Disponible en: <http://masaguaparatodos.unesco-ihe.org>.
28. Lloret, E y Pascual, J. A. (2008). Estudio a escala piloto del sistema de higienización de fangos de depuradora ATAD (*Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion*) para su aplicación al suelo como enmienda orgánica de calidad. Tratamiento y valorización de fangos. III Jornadas Técnicas de Gestión de Sistemas de Saneamiento de Aguas Residuales. VOLUMEN DE PONENCIAS. Generalitat de Catalunya. Departamento de Medio Ambiente y Vivienda. Agencia Catalana del Agua.
29. Malpica, D. (2018). Estudio de la contaminación en la costa sur de la Península de Hicacos asociada al vertimiento de aguas residuales. Matanzas. Tesis en opción al grado de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas. 128 p
30. Marín, A. y Osés, M. (2013). Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con el proceso de Lodos Activados. Tomo I. DOP-CEA Jalisco.

31. Martín, I., Betancourt, J. R., Salas, J. J., Peñate, Baltazar., Pidre, J. R., Sardón, N. (2006). Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. 1ra ed. Canarias, España; Ediciones ITC. 126 p.
32. Martínez, Y. (2005). Análisis de variantes operacionales para la inclusión de etapas de eliminación biológica de nutrientes en EDARs. Matanzas-Girona. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad de Girona. 226 p.
33. McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriott, P. (1991). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. 4ta edición. Madrid: Editorial McGraw-Hill.
34. Menéndez, C. L. y Pérez, J. M. (2007). Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. Ciudad de La Habana; Editorial Félix Varela-Editorial Universitaria, ISBN 978- 959-16-0619-8.
35. Metcalf & Eddy, AECOM. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5ta ed. New York: McGraw Hill, ISBN 978-0-07-340118-8.
36. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (1991) Depuración por lagunaje de aguas residuales. Manual de operadores. Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente. Madrid
37. NC 521:2007. Vertimiento de aguas residuales a la zona costera y aguas marinas. Especificaciones.
38. Pérez, M. E. (2016). Tratamientos de lodos residuales de plantas de tratamientos de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (PB). Cuenca, Ecuador. Trabajo experimental previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. 93 p.
39. Pujol, R y Lienard, A. (1990). Qualitative and quantitative characterization of waste water for small communities. Wat Sci. Tech. 1990, vol. 22, no. 314, p. 253 – 260.
40. Pupo, D. (2016). Manual de operaciones de la PTR Las Conchas.
41. Raffo, E. y Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Revista de investigación Industrial. Lima, Perú. Vol.17, No.1, enero-junio, 2014, p. 71-80. Disponible en:

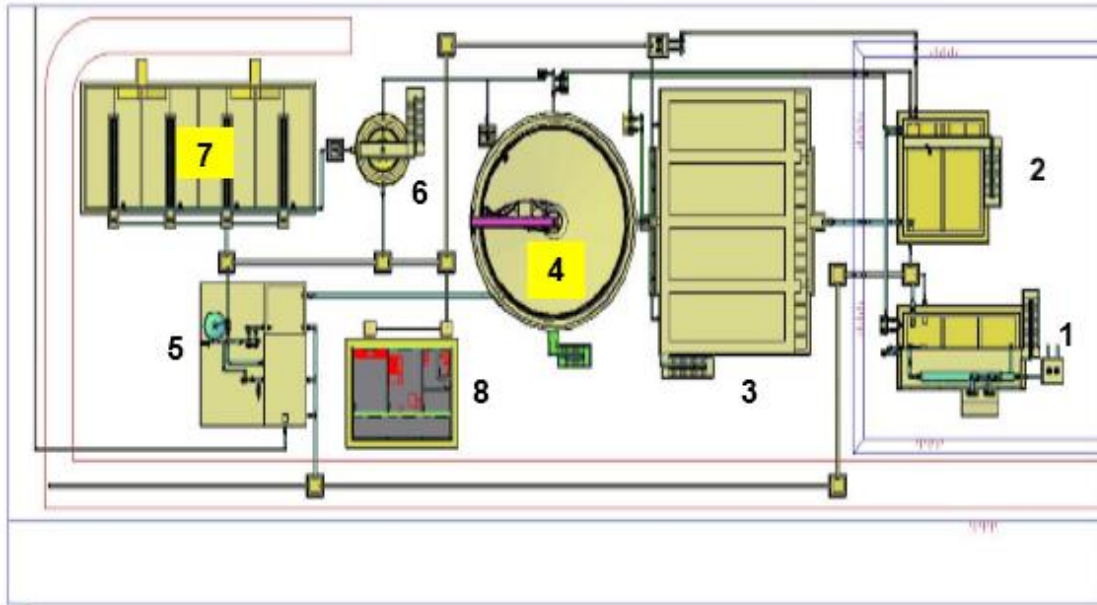
- <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81640855010>. Consulta marzo 2019
42. Ramalho, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona, España; Editorial Reverté, S.A.
43. Ramírez, L. M., Suárez, J. D., Ramírez, J. F. (2011). Evaluación de las propiedades flocculantes de *Malvaviscus arboreus*, *Helio carpus popayanensis* e *Hylocereus undatus* para clarificación de aguas. Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA). Vol. 2, No. 2, p. 33-42. Disponible en: http://www.erevistas.csic.es/fichaarticulo.php?url=oai_revista668:82&oai. Consulta abril 2019.
44. Redacción EFE verde. Noviembre, (2017). Las Palmas gran Canaria. Disponible en: <http://www.efeverde.com> . Consulta abril 2019
45. Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., Sanz, J. M. (2006). VT informe de vigilancia tecnológica, tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid; Ediciones CEIM. 136 p.
46. Rodríguez, L. (2016). Uso de microorganismos eficientes en el tratamiento de aguas residuales del sistema por lodos activados "Hicacos". Varadero, Matanzas. Tesis en opción al grado de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas. 65 p.
47. Rojas, R. (2002). Curso internacional sobre gestión integral de tratamiento de aguas residuales (25-27 septiembre): Conferencia sobre sistemas de tratamientos de aguas residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Organización Panamericana de salud. Organización Mundial de la salud.
48. Romero, T., y Vargas, D. (2017). Uso de microorganismos eficientes para tratar aguas contaminadas. Revista Ingeniería hidráulica y Ambiental (riha). Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana. Vol. 38, No. 3, septiembre -diciembre 2017, p. 88-100, ISSN 1815-591X.
49. Rosabal, J. M., y Garcell, L. (2006). Hidrodinámica y separaciones mecánicas. 2da edición, Tomo I. La Habana: Editorial Félix Varela.
50. Ruiz, Y. (2014). Evaluación de los procesos unitarios en la Estación Depuradora de Aguas Residuales Hicacos. Propuestas de mejoras

- tecnológicas. Matanzas. Tesis en opción al grado de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas. 57 p.
51. Sperling, M. (2007). *Biological Wastewater Treatment Series: Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal and Basic Principles of Wastewater Treatment*. Vol. 1 y Vol. 2. New Delhi, India; Ediciones Aptara Inc. Terry, C., Gutiérrez, J., Abó, M. (2006). Manual de Aguas Residuales en la Gestión Ambiental. La Habana: CIGEA.
 52. Toc, RM. (2012). Efecto de Microorganismos Eficientes (ME) en las Aguas Residuales de la granja porcina de Zamorano, Honduras.
 53. Trujillo-Reyes, J., Sánchez-Mendieta, V., Colín-Cruz, A., Morales-Luckie, R. A. (2008). Obtención y caracterización de un compuesto de carbón activado y una nanoaleación de Fe/Cu como absorbente. *Revista latinoamericana de Recursos naturales*. México, Vol. 4, No. 2, p. 116-121.
 54. Valls, S; Kuchinow, V; Vázquez, E; Yagüe, A. (2008). Utilización de lodo seco de depuradora de aguas residuales como adición en prefabricados. Tratamiento y valorización de fangos. III Jornadas Técnicas de Gestión de Sistemas de Saneamiento de Aguas Residuales. VOLUMEN DE PONENCIAS. Generalitat de Catalunya. Departamento de Medio Ambiente y Vivienda. Agencia Catalana del Agua.
 55. Varila, J. A. y Días, F. E. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala laboratorio. *Revista de tecnología*. Vol. 7, No. 2, julio-diciembre 2008, p. 21-28, ISSN1692-1399.21

ANEXOS

Anexos

Anexo 1: Diagrama de flujo de la PTR "Las Conchas".



Leyenda

1. Sistema de pretratamiento, compuesto por una unidad combinada compacta y un tanque homogeneizador.
2. Tanque de anoxia.
3. Tanque de aireación.
4. Decantador circular.
5. Etapa de tratamiento terciario.
6. Espesador de lodos.
7. Lechos de secado.
8. Cabina de control.

Anexo 2: Unidad combinada compacta y Tanque homogeneizador pertenecientes a la etapa de Pretratamiento de la PTR “Las Conchas”.



Anexo 3: Tanque de anoxia, Tanque de aireación y Decantador circular perteneciente a la etapa de Tratamiento secundario de la PTR “Las Conchas”.



Anexo 3: (Continuación) Decantador circular.



Anexo 4: Sistema de Tratamiento terciario perteneciente a la PTR “Las Conchas”.




Anexo 5: Espesador de lodos y lechos de secado perteneciente a la etapa de Tratamiento de lodos de la PTR “Las Conchas”.



Anexo 5: (Continuación) lechos de secado.



Anexo 6: Certificado de calidad de bioproducto ME expedido por la EEPFIH.

 EEPFIH	Certificado de calidad		LOTE: ME
	Fecha de fabricación: Enero/2019		Fecha de liberación: Febrero/2019
Bioproducto artesanal ME			
Características de calidad			
Propiedades organolépticas		Color: Carmelita oscuro	
		Olor: Agradable a vino	
pH		< 3,5	
Conteo total de microorganismos (UFC/mL)			
Conteo total de bacterias aeróbicas		10 ³ -10 ⁹	
Conteo total de bacterias anaeróbicas		10 ⁴	
Conteo total de hongos y levaduras		10 ⁴ -10 ⁹	
Conteo total de lactobacilos		10 ³ -10 ⁹	
Ausencia de microorganismos patógenos			
<i>Escherichia coli</i>		No presencia	
<i>Staphylococcus aureus</i>		No determinado	
<i>Pseudomona aeruginosa</i>		No determinado	
<i>Salmonella typhi</i>		No presencia	
<i>Coliformes totales y fecales (Termotolerantes)</i>		No presencia	
<i>Shigella</i>		No presencia	
<p>Condiciones de almacenamiento: Almacenar en recipiente cerrado, en lugar fresco a temperatura ambiente de 20-30 °C, protegido de la luz y sin refrigerar.</p> <p>Manipulación: Manipular con cuidado.</p> <p>Vencimiento: Utilizar preferiblemente antes de los 12 meses.</p>			
<p>-----</p> <p>Dra. C. Maykelis Díaz Solares</p> <p>Jefa del Laboratorio de Biotecnología</p> <p>Control de Calidad</p>		<p>-----</p> <p>M.Sc. Leydi Fonte Carballo</p> <p>Especialista Laboratorio de Biotecnología</p> <p>Control de Calidad</p>	

Anexo 7: Límites Máximos Permisibles para el vertimiento de aguas residuales a las zonas costeras según NC 521: 2007.

Parámetro	UM	Clase del Cuerpo Receptor					
		A	B	C ⁽²⁾	D	E	F
pH	U	5.5-9.0	NP	5.5-9.0	5.0-10.0	5.5-9.0	5.0-10.0
Temperatura (1)	°C	40	NP	40	40	40	40
Aceites y grasas	mg/l	15	NP	15-50	50	30	50
Hidrocarburos Totales	mg/l	5	NP	5-10	20	10	20
Materia Flotante		Ausente	NP	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos Sedimentables	ml/l	5	NP	5-15	15	10	15
Sólidos Suspendidos Totales ⁽³⁾	mg/l	30	NP	30-150	150	75	150
DBO ₅	mg/l	30	NP	30 -150	150	75	150
DQO	mg/l	75	NP	75 -300	300	190	300
Nitrógeno Total (Kjeldahl + Nitrato)	mg/l	10	NP	20	40	20	40
Fósforo Total	mg/l	5	NP	7	10	5	10
Coniformes fecales ⁽⁴⁾	NMP/100 ml	200	NP	200-400	1000	1000	SR

(1) En cualquier caso no podrá incrementar el tenor natural del cuerpo receptor marino.

(2) Cuando se dan dos valores, el primero se corresponde con las zonas de pesca críticas para la reproducción, cría y la alimentación. El segundo valor se corresponde para otras zonas de pesca.

(3) No incluye a las algas de las lagunas de oxidación.

(4) Media geométrica.

NP: No se permite vertimiento.

SR: Sin restricción.

Anexo 8: Resultados de los análisis físico-químicos y microbiológicos de las aguas residuales en la etapa de sedimentación secundaria con el empleo de ME.

No de Experimento	Dosis de ME	TRH	pH	CE	STD	Salinidad	Temp.	DQO	N-NTI	P- PO ₄	P- P.T	CT	CF
	mL	Horas	Unidades de pH	µS/cm	mg/L	ups	°C	mg/L			NMP/100mL		
1	0,5	8	7,64	1049,00	524,50	0,52	28,76	226,08	16,49	11,78	13,45	9,1E+05	9,1E+05
2	1,5	8	7,42	1057,50	528,50	0,52	28,70	202,70	16,53	14,14	15,89	2,1E+07	2,1E+07
3	0,3	6	7,72	968,00	483,50	0,47	28,67	163,72	17,86	1,61	2,54	2,3E+05	2,3E+05
4	1	6	7,70	965,50	482,50	0,47	28,68	218,29	16,06	1,93	2,74	4,3E+05	4,3E+05
5	1,5	4	7,50	955,00	477,50	0,47	27,22	233,88	16,26	2,12	3,41	2,0E+06	2,0E+06
6	1	9	7,46	1053,50	526,50	0,52	28,53	218,29	16,23	12,67	13,58	4,3E+06	4,3E+06
7	1	6	7,70	965,50	482,50	0,47	28,68	218,29	16,06	1,93	2,74	4,3E+05	4,3E+05
8	1,7	6	7,62	968,50	486,96	0,47	28,67	187,10	16,02	2,33	2,92	1,2E+06	1,2E+06
9	0,5	4	7,46	942,00	471,00	0,46	26,99	233,88	16,21	2,51	3,50	1,1E+07	4,6E+06
10	1	3	7,38	809,50	479,00	0,47	26,99	226,08	16,22	3,51	3,61	2,9E+06	2,9E+06
SME	0		7,58	992,00	491,67	0,48	28,14	236,48	16,68	6,93	11,69	4,7E+05	4,7E+05
Resultados Estadísticos													
X			7,56	975,09	494,01	0,48	28,18	214,98	16,42	5,59	6,92	1,6E+06	1,4E+06
C.V			1,62	7,10	4,36	4,92	2,72	10,41	3,18	88,10	78,59	414,00	419,00
S			0,12	69,20	21,52	0,02	0,74	22,39	0,52	4,92	5,44	6,4E+06	6,0E+06

Leyenda:

CE: Conductividad Eléctrica; **STD:** Sales Disueltas Totales; **Temp.:** Temperatura.

Anexo 9: Tabla ANOVA Resumen de los resultados estadísticos para cada factor de estudio sobre las variables respuesta para los efluentes de cada experimento.

Variables respuesta	Factores			
	mL ME (A)		TRH (B)	
	Valor de p	Significación	Valor de p	Significación
pH (Unidades de pH)	0,0482	**	0,1354	NS
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	0,8581	NS	0,0088	**
STD (mg/L)	0,5886	NS	0,0029	**
Salinidad (ups)	0,7732	NS	0,0053	**
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0,8653	NS	0,0047	**
DQO (mg/L)	0,8866	NS	0,4715	NS
NTI (mg/L)	0,1589	NS	0,7238	NS
P- PO_4 (mg/L)	0,7150	NS	0,0112	**
P- P.T (mg/L)	0,7633	NS	0,0157	**
CT (NMP/100 mL)	0,4520	NS	0,5166	NS
CF (NMP/100 mL)	0,2727	NS	0,3205	NS

Leyenda:

Cuando el Valor de p:

< 0,05 ** Muy Significativo,

Entre 0,05 y 0,10 * Significativo y

> 0,10 NS No Significativo.

Anexo 10: Resultados de los análisis físico-químicos de los lodos generados la etapa de sedimentación secundaria con el empleo de ME.

No de Experimento	Dosis de ME	TRH	IVL	Sólidos Sediment.	Masa de Lodo seco	pH	Cenizas	M.O
	mL	Horas	mL/g	mL	mg	U	%	%
1	0,5	8	129,09	355,00	12,40	6,48	1,92	98,08
2	1,5	8	125,45	345,00	11,75	6,58	1,79	98,21
3	0,3	6	89,09	245,00	4,10	6,62	3,11	96,89
4	1	6	89,09	245,00	4,15	6,66	1,93	98,07
5	1,5	4	69,09	190,00	3,10	6,64	1,79	98,21
6	1	9	116,36	320,00	11,10	6,54	2,10	97,90
7	1	6	89,09	245,00	4,15	6,66	1,93	98,07
8	1,7	6	96,36	265,00	4,10	6,60	1,97	98,03
9	0,5	4	69,09	190,00	3,25	6,67	1,99	98,01
10	1	3	61,82	170,00	2,80	6,64	3,01	96,99
SME	0		101,81	280,00	5,77	6,59	2,14	97,86
Resultados Estadísticos								
X	94,21	259,09	6,06	6,61	2,15	97,85	94,21	259,09
C.V	24,05	24,05	61,81	0,88	21,44	0,47	24,05	24,05
S	22,66	62,32	3,75	0,06	0,46	0,46	22,66	62,32

Leyenda:

IVL: Índice Volumétrico de Lodos;

U: Unidades de pH;

Sólidos Sediment.: Sólidos Sedimentables;

M.O: Materia Orgánica.

Anexo 11: Tabla ANOVA Resumen de los resultados estadísticos para cada factor de estudio sobre las variables respuesta para los lodos generados en cada experimento.

Variables respuesta	Factores			
	mL ME (A)		TRH (B)	
	Valor de p	Significación	Valor de p	Significación
IVL (mL/g)	0,8243	NS	0,0023	**
Masa de lodo (mg)	0,8960	NS	0,0071	**
M.O (%)	0,2885	NS	0,4288	NS

Leyenda:

Cuando el Valor de p:

< 0,05 ** Muy Significativo

> 0,10 NS No Significativo.

Anexo 12: Tabla ANOVA Resumen de los resultados estadísticos para cada factor y sus interrelaciones sobre las variables respuesta para las Eficiencias de remoción de contaminantes en el efluente.

Variables respuesta	Factores				Interrelaciones					
	mL ME (A)		TRH (B)		AA		AB		BB	
	Valor de p	Sig.	Valor de p	Sig.	Valor de p	Sig.	Valor de p	Sig.	Valor de p	Sig.
Eficiencia DQO (%)	0,8867	NS	0,4714	NS	0,2156	NS	0,6218	NS	0,5220	NS
Eficiencia NTI (%)	0,3032	NS	0,6937	NS	0,2317	NS	0,8053	NS	0,1063	NS
Eficiencia P.T (%)	0,7631	NS	0,0156	**	0,5807	NS	0,7097	NS	0,0717	*
Eficiencia CF (%)	0,2446	NS	0,4192	NS	0,4028	NS	0,0241	**	0,0282	**

Leyenda:

Cuando el Valor de p:

< 0,05 ** Muy Significativo, Entre 0,05 y 0,10 * Significativo y > 0,10 NS No Significativo.

Sig.: Significación de los Factores y las Interrelaciones.

Anexo 13: Diagramas de Pareto para las Eficiencias de Remoción de Contaminantes en los efluentes.

Diagrama de Pareto (Efecto Estandarizado) para la Eficiencia en base a DQO

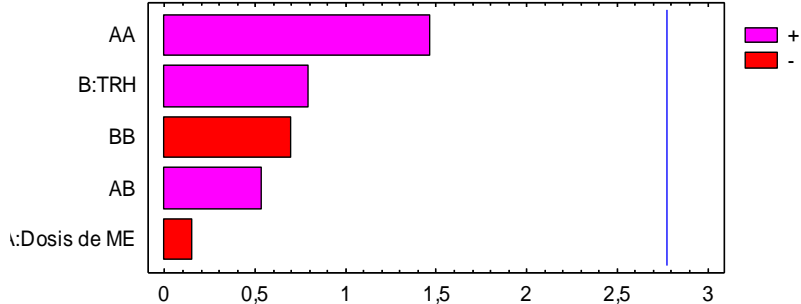


Diagrama de Pareto (Efecto Estandarizado) para la Eficiencia en base a NTI

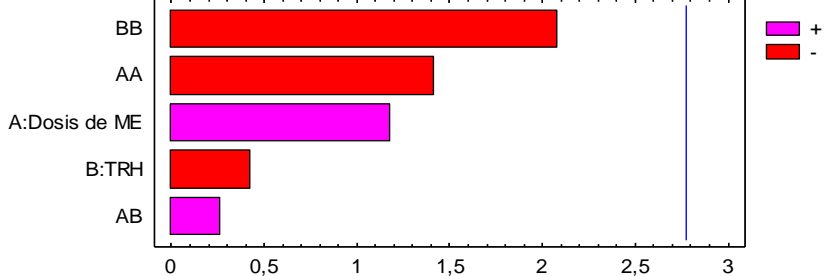


Diagrama de Pareto (Efecto Estandarizado) para la Eficiencia en base a P.T

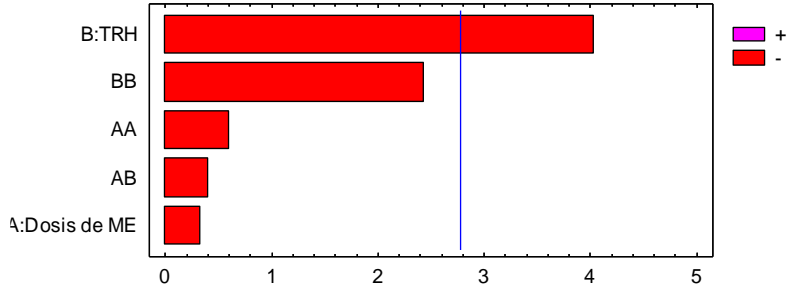


Diagrama de Pareto (Efecto Estandarizado) para la Eficiencia en base a CF

