

**Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil**

**Análisis de bacterias comunes en plantas de tratamientos de  
diferentes efluentes que son indicadores de alta eficiencia en  
remoción de contaminantes**

Informe del Proyecto de Graduación para obtener el grado de Licenciatura en  
Ingeniería Civil

Presenta:


**Catalina Vargas Meneses**

Directora de Proyecto de Graduación:

**Ana Lorena Arias Zúñiga**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
Costa Rica. Enero, 2010

**COMITÉ ASESOR:**

  
Ing. Ana Lorena Arias Zúñiga, M.S. :.  
Directora del proyecto

  
Ing. Paola Vidal Rivera  
Asesor

  
Ing. Irene Campos Gómez, M.Sc.  
Asesora

La suscrita, Catalina Vargas Meneses, cédula 1-1243-0304, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A35504, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación *Análisis de bacterias comunes en plantas de tratamientos de diferentes efluentes que son indicadores de alta eficiencia en remoción de contaminantes*, bajo la Dirección de la Máster, Ana Lorena Arias Zúñiga, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Atentamente,

  
Catalina Vargas Meneses  
A35504

## **DEDICATORIA**

A Dios, por darme la oportunidad de ser parte de su plan de salvación y regalarme todas las bendiciones que tengo en mi vida.

A mi padre, por ser mi fuente de inspiración y ayudarme a encontrar la luz en cada momento en que veía únicamente oscuridad.

A mi madre, por estar siempre presente en cada uno de mis pasos y enseñarme la importancia de dar siempre mi máximo esfuerzo.

A mi hermano y todos mis seres queridos.

A Kermi y Leandro, por amarme incondicionalmente e impulsarme día a día a ser mejor.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Ing. Ana Lorena Arias, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, brindarme su apoyo y su amistad.

Al Ing. Vidal Bolaños, por su guía y su apoyo incondicional.

A la Ing. Irene Campos.

Al personal del laboratorio de microbiología ambiental del CIA,  
muy especialmente a la Dra. Lidieth Uribe,  
por su paciencia y sus enseñanzas.

Al Ing. Adrián Sandy de la Tenería, Cristian Siles del Beneficio  
y Nelson Solís del Condominio por su ayuda.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	12
I. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	13
II. <u>GENERALIDADES</u> .....	16
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
II.3. ANTECEDENTES.....	17
II.4. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	19
II.4.1. <u>Alcances</u> .....	19
II.4.2. <u>Limitaciones</u> .....	19
II.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	20
CAPÍTULO I	
I.1. <u>TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES</u> .....	21
I.1.1. <u>TRATAMIENTO PRIMARIO</u> .....	22
I.1.2. <u>TRATAMIENTO SECUNDARIO</u> .....	23
I.1.3. <u>TRATAMIENTO TERCIARIO</u> .....	24
CAPÍTULO II	
PARÁMETROS MEDIDOS EN LOS TRES TIPOS DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES	
II.1. <u>PARÁMETROS FÍSICOS</u> .....	28
II.1.1. <u>SÓLIDOS</u> .....	28
II.1.1.1. <u>Sólidos totales</u> .....	29
II.1.1.2. <u>Sólidos suspendidos</u> .....	29
II.1.1.3. <u>Sólidos disueltos y no disueltos</u> .....	30
II.1.1.4. <u>Sólidos volátiles</u> .....	30
II.1.1.5. <u>Sólidos sedimentables</u> .....	31
II.1.2. TEMPERATURA.....	32
II.2. <u>PARÁMETROS BIOQUÍMICOS</u> .....	32
II.2.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO) .....	32
II.2.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO) .....	35
II.3. <u>PARÁMETROS QUÍMICOS</u> .....	37

II.3.1. CONDUCTIVIDAD.....	37
II.3.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO-pH.....	38
II.3.3. FÓSFORO.....	39
II.3.4. OXÍGENO DISUELTO .....	40
II.3.5. NITRÓGENO.....	41
II.3.5.1. <u>Nitritos</u> .....	42
II.3.5.2. <u>Nitratos</u> .....	43
II.3.5.3. <u>Nitrógeno amoniacal</u> .....	45
II.4. <u>PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS</u> .....	46
II.4.1. EUCARIOTAS.....	47
II.4.1.1. <u>Hongos</u> .....	47
II.4.1.2. <u>Algas</u> .....	48
II.4.1.3. <u>Protozoarios</u> .....	49
II.4.1.4. <u>Virus</u> .....	50
II.4.2. PROCARIOTAS.....	50
II.4.2.1. <u>Bacterias</u> .....	50

### CAPÍTULO III

#### UBICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LAS QUE SE OBTUVIERON LAS MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES

III.1. <u>MUESTRA 1: TENERÍA</u> .....	52
III.2. <u>MUESTRA 2: BENEFICIO</u> .....	54
III.3. <u>MUESTRA 3: CONDOMINIOS</u> .....	56

### CAPÍTULO IV

#### DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS Y LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS FINALES DE LAS TRES DIFERENTES MUESTRAS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

IV.1. <u>PROCEDIMIENTO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS DEL LABORATORIO</u> .....	58
IV.1.1. PRUEBAS FÍSICAS.....	58
IV.1.1.1. <u>Sólidos totales (ST)</u> .....	58
IV.1.1.2. <u>Sólidos sedimentables</u> .....	59
IV.1.1.3. <u>Sólidos disueltos</u> .....	59

IV.1.1.4. <u>Sólidos filtrables</u> .....	60
IV.1.2. PRUEBAS QUÍMICAS.....	60
IV.1.2.1. <u>Procedimiento de la prueba de Fósforo</u> .....	60
IV.1.2.2. <u>Nitratos</u> .....	61
IV.1.2.3. <u>Nitritos</u> .....	61
IV.1.2.4. <u>Nitrógeno amoniacal (Reactivo Nessler)</u> .....	62
IV.1.3. PRUEBAS BIOQUÍMICAS.....	63
IV.1.3.1. <u>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</u> .....	63
IV.1.3.2. <u>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)</u> .....	63
IV.1.4. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.....	66
IV.1.4.1. <u>Recuentos de Microorganismos</u> .....	67
IV.1.4.2. <u>Identificación de Bacterias</u> .....	67
IV.1.5. ESQUEMAS DE LOS REACTORES QUE SE UTILIZARON PARA SIMULAR LAS CONDICIONES ANAEROBIAS Y AEROBIAS EN EL LABORATORIO.....	69
IV.2. <u>OBTENCIÓN DE RESULTADOS A PARTIR DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO PARA LAS AGUAS DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO Y CADA UNO DE LOS REACTORES ANAEROBIOS Y AEROBIOS</u> .....	70
IV.2.1. PRUEBAS FÍSICAS.....	70
IV.2.1.1. <u>Sólidos</u> .....	70
IV.2.2. PRUEBAS QUÍMICAS.....	71
IV.2.2.1. <u>Fósforo</u> .....	71
IV.2.2.2. <u>Nitratos y Nitritos</u> .....	71
IV.2.2.3. <u>Nitrógeno amoniacal (Reactivo Nessler)</u> .....	72
IV.2.3. PRUEBAS BIOQUÍMICAS.....	72
IV.2.3.1. <u>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</u> .....	72
IV.2.3.2. <u>Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)</u> .....	72
IV.2.4. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.....	73
IV.2.4.1. <u>Recuentos de Microorganismos e Identificación de Bacterias</u> .....	73



## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS QUE SE REALIZARON A LAS TRES MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES

V.1. <u>PRUEBAS FÍSICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> .....	74
V.2. <u>PRUEBAS QUÍMICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> .....	76
V.3. <u>PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS DE LOS REACTORES ANAEROBIOS Y AEROBIOS</u> .....	81
V.4. <u>PRUEBAS BIOQUÍMICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO</u> .....	84
V.5. <u>PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO Y DE LOS REACTORES ANAERODIOS Y AEROBIOS</u> .....	92
V.4.1. MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS.....	92
V.4.2. CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS DE LOS MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS EN LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.....	96

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VI.1. <u>CONCLUSIONES</u> .....	106
VI.2. <u>RECOMENDACIONES</u> .....	110
VII. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	114
VIII. <u>REFERENCIAS</u> .....	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de la metodología de trabajo para el desarrollo del proyecto.....	20
Figura 2: División de sólidos.....	29
Figura 3: Tendencia de los gráficos dependiendo del orden.....	34
Figura 4. Escala de pH.....	38
Figura 5. Solubilidad del oxígeno en el agua destilada saturada con aire a 760 mm Hg. ....	40
Figura 6. Relación entre amoniaco e ión amonio para diferentes concentraciones de nitrógeno amoniacal y pH. ....	45
Figura 7: Ubicación aérea de Tenerife. ....	52
Figura 8: Esquema de planta de tratamiento de aguas residuales con aireación extendida. ....	53
Figura 9: Reactor Biológico, Sedimentador y Sección inicial de la planta, respectivamente. ....	53
Figura 10: Foto aérea del Beneficio. ....	54
Figura 11: Fotografías de la entrada al Beneficio, las instalaciones y la planta de tratamiento de las aguas residuales, respectivamente. ....	55
Figura 12: Esquema Planta de Tratamiento del Beneficio.....	55
Figura 13: Foto aérea de los Condominios. ....	56
Figura 14: Fotografías de la entrada e interior del Condominio Boulevard del Sol, respectivamente. ....	57
Figura 15: Planta de tratamiento del Condominio. ....	57
Figura 16: Horno para prueba de Sólidos Totales. ....	58
Figura 17: Conos de Imhoff. ....	59
Figura 18: Prueba de Sólidos disueltos. ....	60
Figura 19: Colorímetro. ....	61
Figura 20: Elementos necesarios para pruebas de Fósforo, Nitritos y Nitratos..	62
Figura 21: Reactivos para la prueba de Nitrógeno Amoniacal. ....	63
Figura 22: Digestor de DQO y Colorímetro utilizados para pruebas de DQO.....	64

Figura 23: Botellas para DBO. ....	65
Figura 24: Equipo de control de datos e incubadora. ....	65
Figura 25: Esquema de diluciones de muestras. ....	66
Figura 26: Reactor Anaerobio. ....	69
Figura 27: Reactor Aerobio y acercamiento del minitanque que contiene el agua residual tratada, respectivamente. ....	70
Figura 28: Gráficos de los valores de DBO para el Beneficio. ....	89
Figura 29: Gráficos de los valores de DBO para el Condominio.....	90
Figura 30: Gráficos de los valores de DBO para la Tenería. ....	91
Figura 31: Población de <i>pseudomona taetrolens</i> .....	96
Figura 32: Pseudomona del tipo <i>marginalis</i> .....	98
Figura 33: <i>Pseudomona</i> del tipo <i>marginalis</i> . ....	99
Figura 34: <i>Pseudomona fluorescens</i> .....	99
Figura 35: <i>Leuconostoc mesenteroides</i> .....	101
Figura 36: <i>Pseudomona aeruginosa</i> ....	102
Figura 37: <i>Citrobacter sp.</i> .....	103

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Valores de concentración para determinar el orden de los valores experimentales.....	35
Cuadro 2: Clasificación de los hongos acuáticos y del suelo.....	48
Cuadro 3: Clasificación de las algas. ....	49
Cuadro 4: Clasificación de las protozoarios comunes acuáticos y de suelo. ....	49
Cuadro 5: Volúmenes de muestra dependiendo del rango de DBO. ....	64
Cuadro 6: Medios de cultivo y diluciones por utilizar en los recuentos de diferentes microorganismos. ....	67
Cuadro 7: Resultados de Pruebas Físicas. ....	74
Cuadro 8: Resultados de los Parámetros Químicos: OD y Conductividad y el Parámetro Físico Temperatura.....	76
Cuadro 9: Resumen de parámetros químicos y regulación.....	77
Cuadro 10: Parámetros Químicos, Fósforo, Nitritos, Nitratos y Nitrógeno Amoniacal.....	79
Cuadro 11: Valores de Nitrógeno Amoniacal, Amoniaco y Amonio.....	79
Cuadro 12: Valores de Fósforo Reactivo y Fósforo Total.....	79
Cuadro 13: Valores máximos de Parámetros Químicos permitidos por el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales.....	80
Cuadro 14: Resultados de los Parámetros Químicos: OD y Conductividad y los Parámetros Físicos de Temperatura y Sólidos Totales Disueltos de los reactores anaerobio y aerobio. ....	83
Cuadro 15: Parámetros de DQO de las tres muestras de aguas residuales.....	84
Cuadro 16: Parámetros de DBO de las tres muestras de aguas residuales y regulación. ....	85
Cuadro 17: Valores de parámetros de DBO para realizar las gráficas de las tres muestras de aguas residuales. ....	85
Cuadro 18: Microorganismos identificados de las pruebas microbiológicas. ....	93
Cuadro 19: Resultados microbiológicos del Beneficio.....	93
Cuadro 20: Resultados microbiológicos de la Tenería.....	94
Cuadro 21: Resultados microbiológicos del Condominio.....	95

Vargas Meneses, Catalina

Análisis de bacterias comunes en plantas de tratamientos de diferentes efluentes que son indicadores de alta eficiencia en remoción de contaminantes

Proyecto de Graduación - Ingeniería Civil - San José, C.R.

C. Vargas. M., 2009

xi, 106, [0]h; ils. Col.-28 refs.

## **RESUMEN**

En este proyecto se realizó una serie de muestreos de aguas residuales que se encuentran en proceso de descontaminación. Se trabajó de forma simultánea en los reactores, específicamente; cada uno en operación con agua procedente de tres distintos tipos de plantas de tratamiento de agua residual. De las muestras recolectadas se dispuso una cantidad en reactores anaerobios y aerobios, en condiciones de laboratorio para homogeneizar las características de cada agua.

La primera etapa consistió en la caracterización físico-química de las muestras de aguas residuales de efluentes de un tratamiento secundario y de los reactores del laboratorio; los resultados se compararon con los estándares costarricenses, para verificar funcionamiento de cada planta.

Una vez finalizada la primera etapa, se dispuso de las muestras de aguas para generar cultivos de bacterias. Este trabajo se realizó en conjunto con el personal del Laboratorio del Centro de Investigación Agronómica de la Universidad de Costa Rica. Se identificaron únicamente los microorganismos predominantes, para posteriormente comparar los resultados entre los tres tipos de aguas residuales y determinar las que coincidan.

Finalmente, a partir del análisis de los resultados obtenidos tanto de las aguas propiamente del sitio como de los reactores del laboratorio en los pasos anteriores, se estudió los factores favorables y características que hasta hoy son conocidas y que poseen las bacterias, que pueden ayudar en los procesos de descontaminación especialmente, y, de esta forma, poder recomendar las condiciones mínimas con las que deben contar las plantas de tratamiento para mantener los grupos de microorganismos colaborando con el proceso de descontaminación.

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL, AGUAS RESIDUALES, TRATAMIENTOS FÍSICO-QUÍMICOS, TRATAMIENTO MICROBIOLÓGICO.

Ing. Ana Lorena Arias Z. Msc.  
Escuela de Ingeniería Civil.

## **I. INTRODUCCIÓN**

Es de conocimiento mundial que el agua es fundamental para todas las formas de vida conocida. En la actualidad, la escasez de agua y la baja calidad de esta ocasiona serios riesgos en los seres vivos, tanto en la seguridad alimenticia, en la salud, en el bienestar económico y social, así como en la biodiversidad.

En el caso de los humanos, el agua que consumen debería ser potable; sin embargo, debido a todas las actividades que la población realiza diariamente, se ha provocado un aumento descontrolado de aguas residuales, que no cuentan con el control necesario para poder verterlas a los cuerpos de agua o poder ser reutilizada; sin ser esto suficiente problema se suma la desprotección de los manantiales y acuíferos superficiales y subterráneos de aguas, que se ven expuestos a cualquier tipo de accidentes o fenómenos.

Al ser el agua prácticamente el recurso natural más importante para los seres vivientes, es necesario recapacitar si la forma como se utiliza es la correcta. En los últimos años, se ha implementado el reutilizar las aguas residuales tratadas en plantas de tratamiento, para tratar de mantener un ciclo de uso y reuso de agua, permitiéndose aminorar la demanda de agua que viene directamente de las nacientes, y limitarla únicamente para actividades como el consumo, cocción de alimentos, esterilizaron de alimentos e instrumentos médicos, entre otras, y las aguas de segundo uso (aguas residuales tratadas), para algunas actividades industriales, ganadería, y otras actividades en las que la calidad del agua no afecte el producto final.

Para poder reutilizar las aguas tratadas, es necesario cumplir con los reglamentos necesarios en cuanto a la calidad de agua; sin embargo, en Costa Rica las regulaciones con respecto al agua en general no son del todo conocidas o comprendidas, debido a lo específico de cada prueba; por lo que es necesario disponer de personal capacitado para velar por los estándares en

las plantas de tratamiento y mantener la regularidad de muestreos que garanticen el adecuado proceso de descontaminación.

Pretender que el hecho de pasar el agua sucia a través de los diferentes procesos de una planta de tratamiento es suficiente, tiene sentido, siempre que se cumplan las regulaciones y se cuente con el monitoreo constante de las personas debidamente capacitadas para controlar los equipos a cargo de la descontaminación.

Si las plantas de tratamiento cuentan con una sistematización controlada durante los procesos de descontaminación y velan porque todo se haga como fue diseñado, pero no efectúan las pruebas físico-químicas necesarias para asegurar que el agua que se vierte cumple con los estándares de calidad, desperdician los procesos de descontaminación con los que cuentan. Por otra parte, no hay que olvidar el mantenimiento de los equipos, de los que se espera que sean eternos, y son examinados, limpiados o remplazados hasta que dejan de funcionar; dado que estas son las herramientas para realizar el correcto proceso de descontaminación del agua que se vierte.

Por otra parte, además de controlarse el agua que se vierte periódicamente, por medio de las pruebas físico-químicas, no hay que dejar de lado las pruebas bacteriológicas, que, a pesar de ser un tema árido y de poca información, pueden influir en la salud y contaminación del medio ambiente; dado que si se pretende crear ciclos de reuso del agua, es necesario mantener las plantas de tratamiento de agua en óptimas condiciones, para evitar poblaciones de microorganismos que puedan perjudicar la vida de las personas si llegan a estar en contacto con el agua tratada.

Como consecuencia de todo lo antes mencionado, en la última década, en Costa Rica, se ha venido incrementando la preocupación por regular el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, los estudios solicitados por el Ministerio de Salud, Acueductos y Alcantarillados

entre otras entidades gubernamentales, para determinar el buen funcionamiento de las plantas, son poco descriptivos, dado que los únicos parámetros en los que se enfocan los reglamentos son físico-químicos y, en cuanto a pruebas microbiológicas, el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales solicita en los ensayos los coliformes fecales, que no especifican la calidad del agua o el funcionamiento de la planta en sí.

La importancia de realizar un análisis bacteriológico en los procesos tratamiento de las aguas residuales, permite detallar la mayoría de los microorganismos que se generan en la planta; con esto pueden ser clasificarlos y determinar cuáles de ellos sería aconsejable mantener a lo largo del proceso de descontaminación para mejorar la calidad del agua que es vertida a los cuerpos de agua o alcantarillados sanitarios; de igual manera, enfatizar en los procesos que deben eliminar microorganismos que perjudican el bienestar de los seres vivos, especialmente los humanos.

Este proyecto pretende buscar la coincidencia de microorganismos que favorecen la remoción de contaminantes en las aguas residuales tratadas en diferentes tipos de plantas de tratamiento (industrial, beneficio de café y aguas negras de urbanización); con esto se podría pensar en estandarizar recomendaciones y prácticas en las instalaciones, que ayudarían a incrementar su eficiencia; con esto se podría mejorar la calidad de las aguas vertidas que posteriormente puedan reusarse para diferentes fines.



## **II. GENERALIDADES**

### **II.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar las bacterias comunes de diferentes plantas de tratamiento que son indicadores de alta eficiencia en remoción de contaminantes, con el fin de proponer una serie de recomendaciones para mantenerlas activas durante el proceso de tratamiento de agua y mejorar la calidad del agua vertida.

### **II.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Buscar información teórica acerca de los procesos de tratamiento de agua que implementan el uso de microorganismos, para mejorar la calidad de las aguas antes del vertido.
- Detallar cada una de las pruebas que se realizarán en las diferentes plantas, para determinar las bacterias presentes en las muestras.
- Analizar los resultados obtenidos de las diferentes pruebas que se realicen a las muestras de las diferentes plantas.
- Determinar la coincidencia de bacterias obtenidas en las diferentes plantas, que contribuyan a la remoción de contaminantes.
- Analizar de manera estándar las diferentes posibilidades de mantener las bacterias que contribuyen a la remoción de contaminantes.

### **II.3. ANTECEDENTES**

Las aguas residuales que son depositadas en cuerpos de agua o alcantarillados sanitarios, por lo general, deben pasar por tres diferentes procesos de descontaminación, antes de ser vertidas; esto se acostumbra en la mayoría de países, sin embargo, dependiendo del tipo de agua residual, con pasarlo únicamente por dos de los procesos es suficiente para cumplir con la norma de calidad antes de verterlos; además, los tratamientos de nivel tres son muy costosos y la información para ponerlos en práctica necesita de personal especializado.

La creciente preocupación por cuidar el ambiente ha impulsado, en los últimos años, proyectos de graduación enfocados al tratamiento de aguas residuales; algunos de ellos tienen un enfoque similar al que se pretende en este proyecto, dado que en una manera muy general incluye diferentes estudios puntuales que se han realizado en otras investigaciones.

Muchas de las investigaciones, en la rama Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, han sido promovidas por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad; el cual ha impulsado proyectos con respecto al tratamiento terciario de aguas residuales; algunos de ellos han estudiado el tratamiento con plantas acuáticas, biofiltros aeróbicos y la implementación de aireación de agentes contaminantes.

Algunos de los estudios que pueden utilizarse como base para este proyecto se mencionan a continuación:

El proyecto de Edgar Ulate en el 2002, que consiste en un tratamiento con plantas acuáticas para aguas provenientes de beneficios de café, en el que evaluó el aporte de descontaminación, por parte de este tipo de flora.

En el año 2006, el proyecto de graduación de Vidal Rivera se dedicó al estudio por *Aireación aplicada a los requerimientos de la flora microbiana como herramienta para inducir nitrificación y desnitrificación en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Esta tesis se realizó de forma puntualizada y, a pesar de lo extenso de la investigación y el análisis de las muestras, no fue posible clasificar todos los microorganismos que el agua contenía.

Por otra parte, en el año 2004, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, se desarrollaron dos informes de trabajo final de graduación: el primero de Teresita Matamoros Carvajal, que realizó la *Valoración del uso de Bacterias como Removedoras de Compuestos Nitrogenados del Agua*. En este proyecto se valoró la condición de la flora microbiana presente en la planta y su influencia en la remoción de compuestos nitrogenados; de ese estudio se obtuvo dos tipos de bacterias que actúan como removedoras de contaminantes; sin embargo, no fue específica la eficiencia con que lo hacen. El segundo trabajo fue el de Dahiana Rodríguez Moya, que realizó la *Evaluación Físico-Química y Microbiológica del Sistema de Tratamientos de Aguas Residuales*, específicamente de la Planta Avícola San Rafael, Corporación Pipasa. Con este trabajo se pudo determinar la eficiencia de la planta, comparando los parámetros analizados con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales.

A pesar de la existencia de estudios puntualizados en el análisis de remoción de contaminantes de aguas residuales, hasta el momento, ninguno de ellos se ha enfocado en la necesidad de buscar soluciones comunes y aplicables en plantas de agua, sin importar el origen de ellas, que es lo que se pretende con esta investigación.

## **II.4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **II.4.1. Alcances**

- Las aguas que se utilizaron para el desarrollo del proyecto se han tomado de tres diferentes plantas de tratamiento: uno de aguas servidas de un condominio, aguas residuales de industria (tenería) y un beneficio de café; para mantener dentro de un rango adecuado de tiempo el muestreo y pruebas de cada una de las muestras de aguas residuales.
- Para homogeneizar los tres diferentes tipos de aguas residuales, se colocó en un ambiente controlado de laboratorio, una porción de cada una de las muestras en reactores tanto anaerobios como aerobios, con el fin de garantizar igualdad de condición a la hora de comparar los resultados de las pruebas realizadas.
- Se realiza una caracterización cualitativa y cuantitativa de las bacterias presentes en las plantas de tratamiento, para identificar las coincidentes entre las tres. Estos análisis se efectúan en el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA).

### **II.4.2. Limitaciones**

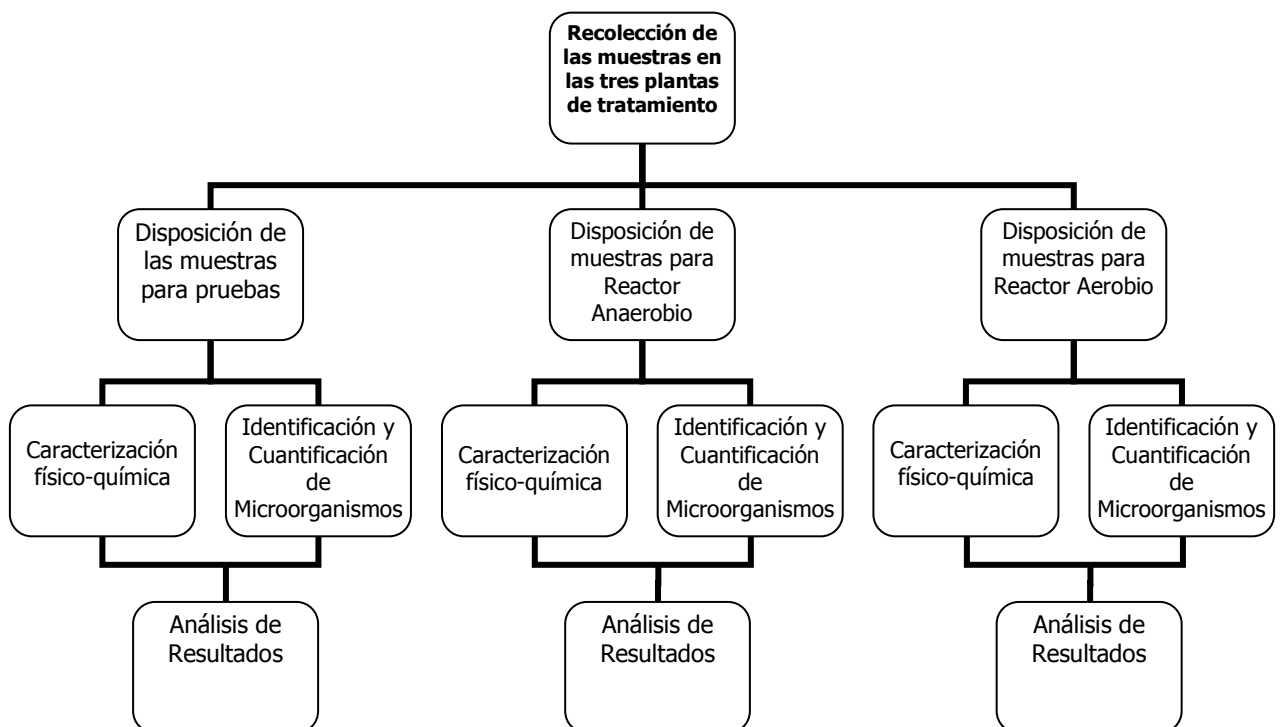
- La identificación de las bacterias se limita a las especies disponibles en la base de datos del programa BIOLOG con que cuenta el CIA y únicamente a la familia de bacteria predominante de cada plato de cultivo del laboratorio.
- La insuficiencia de estudios que revelen más a fondo las características de las bacterias, específicamente pruebas que indiquen la eficiencia de los microorganismos en la remoción de contaminantes en las aguas residuales.

- El tiempo de cultivo de algunos microorganismos es muy largo, por lo que extiende mucho el lapso de tiempo entre la toma de la muestra y los resultados de las pruebas microbiológicas.
- Únicamente se utilizaron tres diferentes muestras de aguas residuales de plantas de tratamiento, lo que limita el conocer la semejanza de microorganismos presentes en otras plantas de tratamiento que ayuden a crear una estandarización de recomendaciones, para la remoción o incremento de las bacterias que favorezcan la remoción de contaminantes durante el proceso de descontaminación de las aguas.

## II.5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A continuación se presenta el esquema de trabajo para el desarrollo de las pruebas físico-químicas y microbiológicas que se van a realizar a lo largo del proceso de investigación, para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Figura 1: Esquema de la metodología de trabajo para el desarrollo del proyecto.



Fuente: La autora.

## CAPÍTULO I

Para el desarrollo del capítulo, se utilizó como fuentes de referencia los proyectos de graduación en: *Aireación aplicada a los requerimientos de la flora microbiana como herramienta para inducir nitrificación y desnitrificación en plantas de tratamiento de aguas residuales*, *Valoración del uso de bacterias como removedoras de compuestos nitrogenados del agua*; y *Evaluación físico-química del sistema de tratamiento de aguas residuales*. Y en cuanto a libros de texto *Ingeniería Ambiental*, *Ingeniería de aguas residuales*, *Tratamiento y depuración de las aguas residuales* y *Química para ingeniería ambiental*; para el caso de mayor detalle de las referencias en la bibliografía. Por último, se tomó información de las páginas web que se documentaron en las referencias al final del proyecto.

### **I.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales pueden proceder de diferentes sitios, como las producidas por los residenciales, instituciones, locales comerciales e industrias. En la actualidad, la generación de esta agua va en aumento; por lo que es necesario tomar en cuenta los diferentes tratamientos que se requieren para mejorar la calidad de las aguas residuales antes de ser vertidas a los cuerpos de agua (ríos, lagos, entre otros).

Para el tratamiento de las aguas residuales, es necesaria la separación física inicial de los sólidos, indiferentemente de donde procedan las aguas; una vez hecho esto es necesario convertir la materia biológica disuelta en el agua en una masa sólida, utilizando las bacterias adecuadas que generalmente se encuentran en las aguas; posteriormente a la separación de material biológico, las aguas residuales pueden ser tratadas por un proceso de desinfección, ya sea por medio de procesos físicos o químicos. Una vez tratadas estas aguas, ya pueden ser vertidas en los cuerpos de agua, si cumplen con los parámetros de calidad establecidos en los reglamentos.

Típicamente, los procesos de tratamiento de aguas residuales se dividen en tres procesos conocidos como tratamiento primario (asentamiento de sólidos), tratamiento secundario (tratamiento biológico de sólidos flotantes y sedimentados) y tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, microfiltración o desinfección).

### **I.1.1. TRATAMIENTO PRIMARIO**

Este tratamiento es para reducir aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos; provenientes de la industria o los hogares costarricenses. Está enteramente hecho con equipo especializado, de ahí conocido también como tratamiento mecánico. En este proceso, se dan diferentes etapas como la remoción de sólidos, la remoción de arenas y la sedimentación.

*La remoción de sólidos se da cuando el afluente es filtrado en cámaras de rejillas, las cuales se utilizan para eliminar todo tipo de objetos grandes como trapos, barras, viseras, compresas, latas, frutas, papel higiénico, entre otros. Este tipo de basura se elimina porque esto puede dañar equipos sensibles en la planta de tratamiento de aguas residuales; además, los tratamientos biológicos no están diseñados para tratar sólidos.*

*La remoción de arena es la etapa que también se conoce como escaneo o maceración; usualmente, incluye un canal de arena donde la velocidad de las aguas residuales es cuidadosamente controlada para permitir que la arena y las piedras de ésta tomen partículas, pero todavía se mantiene la mayoría del material orgánico con el flujo. Este equipo es llamado colector de arena. En este primer proceso de tratamiento, es necesario que regularmente se estén removiendo la arena y las piedras para prevenir daño en las bombas y otros equipos en las etapas restantes del tratamiento.*

*La sedimentación* en muchas plantas se da en grandes tanques circulares o rectangulares

Muchas plantas tienen una etapa de sedimentación donde el agua residual se pasa a través de grandes tanques circulares o rectangulares, que son usualmente conocidos como clarificadores primarios o tanques de sedimentación primarios, tales tanques son lo suficientemente grandes para permitir que los sólidos de mayor tamaño se asienten y los sólidos de menor tamaño que flotan puedan formar una nata que posteriormente se pueda eliminar.

En todo tratamiento primario, el propósito principal es la generación de un líquido homogéneo que pueda ser tratado de forma biológica, y fangos o lodos que puedan ser transportados y tratados en diferentes etapas.

### **I.1.2. TRATAMIENTO SECUNDARIO**

En esta etapa, se busca la degradación del contenido biológico de las aguas residuales, en la mayoría por la basura generada por el ser humano, como: residuos de comida, jabones o detergentes; la mayoría de las aguas son tratadas utilizando procesos biológicos aeróbicos; para que este proceso sea efectivo es necesario que exista presencia de oxígeno y un sustrato en el cual se pueda desarrollar.

Durante el proceso biológico, las bacterias y los protozoarios consumen los contaminantes biodegradables como azúcares, grasas, moléculas, entre otros, produciendo flóculos con los fragmentos de las partículas solubles. Ahora bien, si se habla de un sistema fijo de película requiere superficies más pequeñas; al contrario de un sistema suspendido equivalente, que es capaz de generar choques en el cargamento biológico y provee cantidades altas del retiro para el DBO y los sólidos suspendidos en los sistemas fijados de película.



A lo largo de esta etapa de tratamiento, se puede dar una variedad de métodos, como son los filtros de desbaste, los fangos activados, filtros aireados biológicos, sedimentación secundaria, entre otros.

*Los filtros de desbaste* se utilizan especialmente para cargas orgánicas fuertes o variables, característicamente industriales. Consta de filtros altos, de formas circulares, llenos con un filtro sintético en el que las aguas residuales son depositadas en una cantidad relativamente alta. Los diseños de los filtros permiten una alta carga hidráulica y un alto flujo de aire.

*Los fangos activados* usan una variedad de mecanismos y procesos para utilizar oxígeno disuelto (OD) y de esta manera incrementar el crecimiento de organismos biológicos que ayudan a eliminar materia orgánica. Por otra parte, en condiciones ideales pueden convertir amoníaco en nitrito y nitrato, y en casos extremos en gas nitrogenado.

*Los filtros aireados biológicos o anóxicos* se encargan también de reducir, de forma biológica, el carbono, nitrificación o desnitrificación; los filtros contienen una capa de piel de filtro; el propósito de este sistema es retener la biomasa activa que se une a él y a los sólidos suspendidos del filtro. La reducción del carbón y la conversión del amoníaco ocurre en medio aerobio, y alguna vez alcanzado en un sólo reactor; mientras la conversión del nitrato ocurre en una manera anóxica.

Por último, *la sedimentación secundaria* es el paso final de la etapa secundaria del tratamiento; es retirar los flóculos biológicos del material de filtro y producir agua tratada con bajos niveles de materia orgánica y materia suspendida.

### **I.1.3. TRATAMIENTO TERCIARIO**

Esta etapa final del tratamiento pretende aumentar la calidad de las aguas residuales que se vierte a los cuerpos de agua, y así cumplir con los límites

máximos permitidos en el país. Las plantas de tratamiento pueden contar con más de un proceso de eliminación de contaminantes; entre los utilizados están: la filtración, lagunas, tierras húmedas construidas, remoción de nutrientes y desinfección; en el caso de este último se utiliza para pulir los efluentes.

*La filtración* se hace para remover las arenas y la materia suspendida; para este proceso se utiliza carbón activado, y el sobrante de este remueve las toxinas residuales.

*Las lagunas* son aerobias y proporcionan el espacio necesario para fomentar la mejora biológica de almacenaje de los efluentes de las aguas tratadas; en estos métodos, los invertebrados de alimentación del filtro pequeño, tales como Daphnia y especies de Rotifera, asisten grandemente al tratamiento removiendo partículas finas.

*Las tierras húmedas construidas* están constituidas por camas de caña y una cantidad de espacios similares que proporcionan un alto grado de mejora biológica aerobia y pueden ser utilizados a menudo en lugar del tratamiento secundario para las comunidades pequeñas. Un ejemplo es una pequeña cama de cañas (o camas de lámina) utilizada para limpiar el drenaje del lugar de los elefantes en el parque zoológico de Chester, en Inglaterra.

*La remoción de nutrientes* se incorpora dado que muchas de las aguas residuales contienen altos niveles de nutrientes como nitrógeno y fósforo; estos nutrientes en bajas concentraciones pueden ser perjudiciales para los seres vivos de los cuerpos de agua, como los peces y los invertebrados (ejemplo, el amoníaco); por otra parte, pueden favorecer el crecimiento de mala hierba y algas que generan apariencias desagradables en los sitios donde se descargan los efluentes; por otra parte, las algas pueden producir toxinas y bacterias que consumen el oxígeno del agua y de esta manera provocar la muerte de los peces y toda clase de vida acuática.

El retiro del nitrógeno o del fósforo de las aguas residuales se puede alcanzar mediante la precipitación química o biológica.

La remoción del nitrógeno se efectúa con la oxidación biológica del nitrógeno del amoníaco al nitrato; mediante esta reducción el nitrato es convertido al gas del nitrógeno (desnitrificación), que se lanza a la atmósfera. Estas conversiones requieren condiciones cuidadosamente controladas para permitir la formación adecuada de comunidades biológicas. Para reducir el nitrógeno, también se pueden utilizar los filtros de arena, las lagunas y las camas de lámina.

La remoción del fósforo se puede hacer de varias maneras: la primera de forma biológica en un proceso llamado retiro biológico realizado del fósforo, y segundo es el proceso especialmente bacteriano, llamado Polyphosphate, que acumula organismos, se enriquecen y acumulan selectivamente grandes cantidades de fósforo dentro de sus células. Otra forma de retirar el fósforo se puede alcanzar por la precipitación química con las sales del hierro (por ejemplo: cloruro férrico) o del aluminio (por ejemplo: alumbre). El fango químico que resulta, sin embargo, es difícil de operar, y el uso de productos químicos en el proceso del tratamiento es costoso.

*La desinfección* tiene como propósito reducir substancialmente el número de organismos vivos en el agua residual tratada que se descargará nuevamente dentro del ambiente. La efectividad de la desinfección depende de la calidad del agua que es tratada dependiendo de la turbiedad, pH, etc. Según estos parámetros es que se establece la dosis de desinfectante (concentración y tiempo).

Las aguas turbias son tratadas con menor éxito, puesto que la materia sólida puede blindar organismos, especialmente de la luz ultravioleta; más aún si los tiempos del contacto son bajos. Generalmente, tiempos de contacto cortos, dosis bajas y altos flujos influyen en contra de una desinfección eficaz. Los métodos comunes de desinfección incluyen el ozono, la clorina, o la luz UV. La

Cloramina, que se utiliza para el agua potable, no se utiliza en el tratamiento de aguas residuales, debido a su persistencia.

El método más utilizado de desinfección es utilizando el cloro, dado su bajo costo y el largo periodo de eficiencia; sin embargo, este tipo de desinfección puede generar compuestos orgánicos clorados que pueden ser carcinógenos o dañinos para el ambiente. Las clorinas o cloraminas residuales pueden ser tóxicas para especies acuáticas; por tanto, el efluente debe ser tratado químicamente desclorinado, que es de gran costo y complejidad.

Otro tipo de desinfección es la luz ultravioleta (UV), que se ha comenzado a utilizar en vez de la desinfección con cloro, dados los cuidados que se tienen que implementar antes de verter las aguas residuales a los cuerpos de agua receptores. Lo que hace la radiación con UV es dañar las estructuras genéticas de los virus, bacterias y cualquier tipo de organismos patógenos, impidiéndoles reproducirse. El mayor problema que presenta este tratamiento es la dependencia de mantenimiento y reemplazo frecuente de las lámparas, así como un efluente altamente tratado para impedir que cualquier sólido presente en este, impida que la radiación con UV llegue a todos los microorganismos.

Por último, la desinfección con Ozono ( $O_3$ ) se genera pasando oxígeno ( $O_2$ ) por un potencial de alto voltaje provocando un tercer átomo de oxígeno. El ozono tiene la característica de ser muy inestable y reactivo, por lo que toda materia orgánica que entre en contacto con el será oxidada de forma inmediata. El ozono se considera más seguro que la desinfección con cloro, debido a que este último necesita un alto cuidado a la hora del almacenamiento, dada su alta toxicidad; aun así la desinfección con ozono es muy poco utilizada debido al alto costo de los equipos que generan el  $O_3$  y las condiciones de operación de estos.

## **CAPÍTULO II**

### **PARÁMETROS MEDIDOS EN LOS TRES TIPOS DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES**

Al igual que el capítulo anterior se utilizaron las mismas fuentes de información, además del informe de la Reunión Nacional de Fijación de Nitrógeno *Nuevos Confines de la Fijación Biológica de Nitrógeno*, el *Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental*, el libro de *Oxidation of Isomaltose by Pseudomonas taetrolens*, y el *Manual of Clinical Microbiology*.

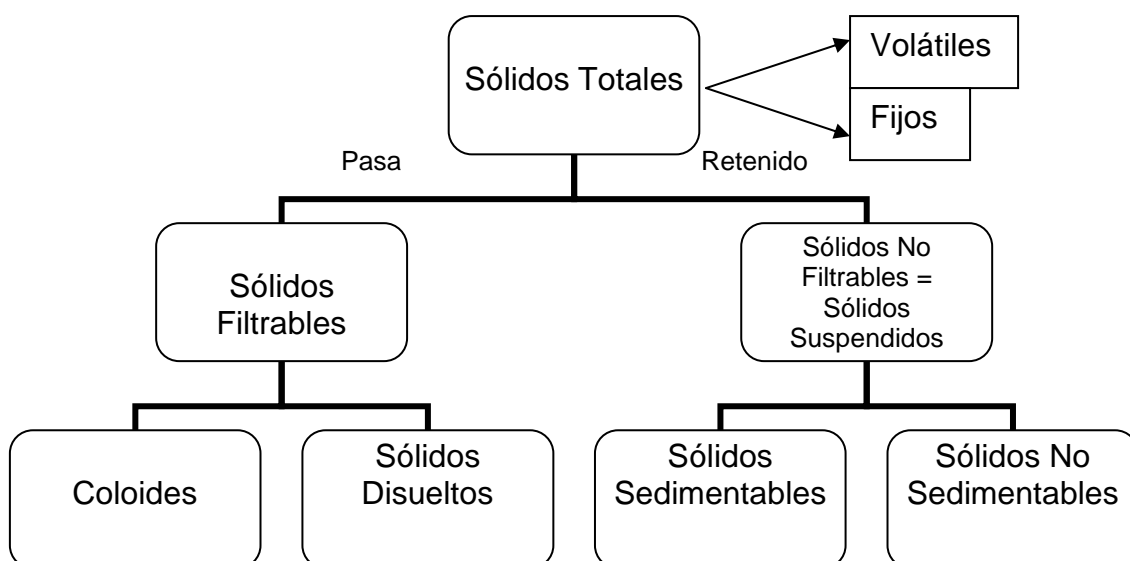
#### **II.1. PARÁMETROS FÍSICOS**

##### **II.1.1. SÓLIDOS**

La cantidad de sólidos disueltos en el agua depende de la temperatura del agua y el tipo de sólido, así como de las impurezas que se encuentren en el agua. Una regla que se puede aplicar siempre es que al incrementar la temperatura la solubilidad de los sólidos aumenta, inclusive puede llevar a descomponer a los sólidos en subcomponentes.

En la mayoría de los casos, los sólidos en suspensión se encuentran en forma tosca, lo que provoca que en muchos casos absorban y difundan la luz; por otra parte, estos sólidos también generan turbidez. Dependiendo de las condiciones de los sólidos, estos se pueden clasificar como lo muestra el siguiente diagrama:

Figura 2: División de sólidos



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental, modificado por la autora.

#### **II.1.1.1. Sólidos totales**

La determinación de sólidos totales se efectúa mediante la evaporación y secado de una determinada muestra en un recipiente cuantificable de peso conocido. En los análisis de aguas residuales, estos valores no tienen mucha importancia, debido a que la medición de la materia contaminante en estas aguas es más exacta con pruebas como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La determinación de los sólidos es indispensable para el diseño y funcionamiento de las unidades de digestión de lodos, de los filtros de vacío y de los de incineración.

#### **II.1.1.2. Sólidos suspendidos**

Los sólidos suspendidos permiten determinar la concentración de residuos contaminantes, así como la eficiencia de las unidades de tratamiento, específicamente los sedimentos primarios con los que se puede cuantificar la

carga de los restos de contaminantes en las unidades secundarias del tratamiento biológico.

Este parámetro físico se utiliza en plantas de tratamiento grandes, para determinar de forma rutinaria la eficiencia de las unidades de tratamiento. Es también muy importante en el control de contaminación en corrientes receptoras y en el control de aireación de los sólidos en el proceso de lodos activados.

#### **II.1.1.3. Sólidos disueltos y no disueltos**

La cantidad de sólidos disueltos en las aguas residuales varía significativamente, dependiendo de donde provengan; la mayoría de la materia orgánica se encuentra en forma de sólidos disueltos. En los laboratorios, las pruebas de sólidos disueltos se deben llevar a cabo a una temperatura de 108 °C en lugar de los 103 ó 105 °C de los sólidos totales; es necesario estas temperaturas tan altas para poder remover todo el agua que pueda interferir en la prueba.

En los lodos, la materia orgánica está en disolución y la porción disuelta es de menor importancia; es por esto que se consideran un caso extremo. La determinación de la cantidad de materia disuelta y sin disolver se alcanza al hacer pruebas en los sólidos filtrables. Los sólidos no disueltos se conocen como materia en suspensión o sólidos suspendidos.

#### **II.1.1.4. Sólidos volátiles**

El llevar a cabo las pruebas de sólidos volátiles ayuda a determinar si hay presencia de materia orgánica en las aguas de uso doméstico, industrial y en lodos. Las pruebas se llevan a cabo con la combustión de la materia orgánica para obtener dióxido de carbono y agua; durante el ensayo, es necesario controlar la temperatura mientras se da la combustión, para prevenir la

descomposición y volatilización de sustancias inorgánicas, mientras se completa la oxidación de la materia orgánica. Al cuantificar el peso y reportarse pérdidas se interpreta como materia orgánica.

En el análisis de sólidos volátiles, la ignición se da a los 550°C, dado que es la temperatura más baja a la que la materia orgánica (como residuos de carbón) puede ser oxidada a velocidad relativamente razonable. Por otra parte, a esta temperatura se minimiza la descomposición de sales inorgánicas, con excepción del carbonato de magnesio; la mayoría de estas sales son muy estables.

#### **II.1.1.5. Sólidos sedimentables**

Los sólidos en suspensión que se logran sedimentar en condiciones de calma, por influencia de la gravedad, son conocidos como sólidos sedimentables; únicamente sedimenta el material grueso que posee densidad mayor a la del agua; un ejemplo son los lodos que están constituidos por acumulaciones de sólidos sedimentables.

En aguas residuales, algunos valores máximos permitidos para el reglamento de vertido y reuso de aguas residuales son los siguientes: si el agua es vertida directamente a un alcantarillado sanitario:

- Sólidos suspendidos → 300 mg/l
- Sólidos sedimentables → 5 ml/l

Por otra parte, los valores máximos permitidos por el reglamento para las aguas vertidas a los cuerpos de aguas receptoras son:

- Sólidos suspendidos → 50 mg/l
- Sólidos sedimentables → 1 ml/l



Para el caso de los sólidos disueltos en las aguas residuales, en el Reglamento Evaluación de Cuerpos de Agua, el valor máximo para que se pueda clasificar el agua como relativamente utilizable y sin problemas de verterlo al cuerpo de agua debe ser de 250 mg/l.

### **II.1.2. TEMPERATURA**

La temperatura del agua es un parámetro de importancia, debido a su influencia en el desarrollo de la vida acuática, así como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción; además de la aptitud del agua para ciertos usos útiles. Este parámetro también interfiere de forma directa en las reacciones bioquímicas y enzimáticas de los microorganismos que participan en el tratamiento de las aguas residuales.

Según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, la temperatura de las aguas debe mantenerse entre los 15°C y los 25°C, para que se den las condiciones óptimas de vida.

## **II.2. PARÁMETROS BIOQUÍMICOS**

### **II.2.1. DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)**

La DBO, es el oxígeno consumido por las bacterias necesarias para estabilizar la materia orgánica que puede servirles de alimento y ser capaces de oxidarse generando energía en condiciones aeróbicas.

Los ensayos de DBO, se utilizan para determinar el poder contaminante de los residuos, en términos de la cantidad de oxígeno requerido por los organismos vivos, principalmente las bacterias; de esta manera, se cuantifica la cantidad de materia orgánica degradada en el residuo.

En ingeniería ambiental, la prueba del DBO es muy importante para determinar la concentración en aguas de residuos domésticos e industriales; sumado a esto, se utiliza para el control de contaminantes comunes, así como para la determinación de regulaciones y evaluaciones de la capacidad de purificación de cuerpos receptores de aguas.

Para el caso del ciclo de descomposición de la materia orgánica, la reacción se considera completa en 20 días; sin embargo, para la prueba se considera únicamente 5 días de incubación, dado que es suficiente para determinar un porcentaje razonablemente grande de DBO.

Para que el ensayo sea cuantificable, es necesario que se realice a una temperatura de 20°C para minimizar la variabilidad de la velocidad de reacción; además, esta temperatura se aproxima a la temperatura media de las aguas naturales.

Muchos estudios han demostrado que la tasa de reacción de la DBO es generalmente de primer orden; otra forma de comprender esto es que la tasa es proporcional a la cantidad de materia orgánica oxidable que permanece a cualquier tiempo. Una vez que la población de microorganismos no sufre cambios perceptibles, significa que la tasa de reacción es controlada por la cantidad de comida disponible para los organismos, y se expresa como:

$$- \frac{dC}{dt} \propto C \text{ ó } - \frac{dC}{dt} = kC$$

Donde C representa la concentración de materia orgánica oxidable al inicio del intervalo t, y k la constante de la tasa de reacción. Esto significa que la tasa de reacción decrece conforme la concentración C de comida o materia orgánica también decrece. Por lo tanto, C se puede expresar como:

$$C = C_0 e^{-kt}$$

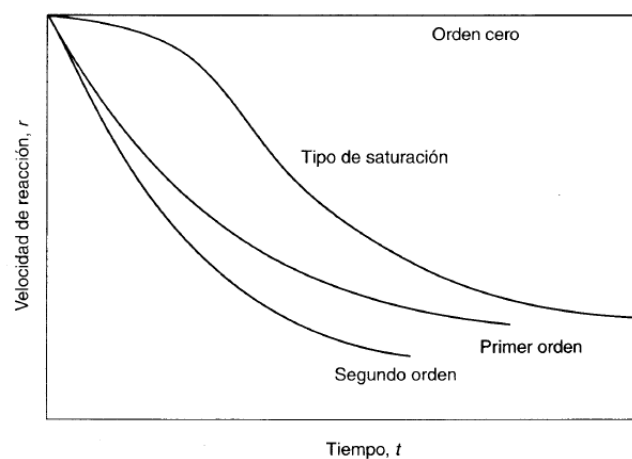
Consecuentemente, la cantidad de contaminante que permanece después de un tiempo  $t$  ha colapsado en una fracción de  $C_0$  que corresponde a  $e^{-kt}$ . En algunos casos, se desea extrapolar resultados a otros tiempos; para ello la ecuación se modifica como:

$$C = C_0(1 - e^{-kt})$$

El valor de  $k$  se determina por experimentación.

Otra forma de determinar la concentración de DBO es a partir de conocer la velocidad de reacción, con el tiempo para diferentes órdenes, como se observa a continuación:

Figura 3: Tendencia de los gráficos dependiendo del orden



Fuente: Henry, 1999

De la figura anterior, se observa la tendencia de los datos dependiendo del orden; no obstante, se puede garantizar el orden de los valores de concentración al generar la recta de mejor ajuste y la regresión ( $R$ ) a partir de mínimos cuadrados y el valor que esté más próximo a uno es el mejor. Para determinar la concentración se debe hacer conteniendo los valores para cada concentración según el orden, como se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro 1: Valores de concentración para determinar el orden de los valores experimentales.

Orden	Ordenada en el Origen	Gráfica lineal	Pendiente
0	DBO (mg/l)	DBO (mg/l) vrs. t	-k
1	Ln[DBO (mg/l)]	Ln[DBO (mg/l)] vrs. t	-k
2	$\frac{1}{\text{DBO (mg/l)}}$	$\frac{1}{\text{DBO (mg/l)}}$ vrs. t	-k

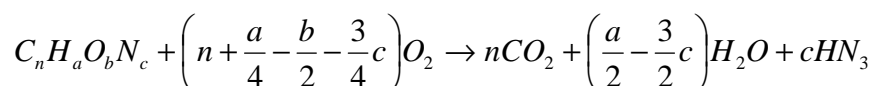
Fuente: La autora.

Utilizando el cuadro anterior, se puede determinar el valor de k y el de la concentración de DBO en cualquier instante en el tiempo.

En nuestro país, la norma permite el vertido y reuso de aguas residuales con DBO de hasta 300 mg/l, en aguas vertidas a alcantarillados sanitarios y de 50 mg/l, si el agua residual es depositada en un cuerpo de agua; no obstante, dependiendo del origen de las aguas residuales, la norma costarricense da otros límites máximos para la DBO. Este dato de DBO puede interpretarse en términos de materia orgánica al igual que la cantidad de oxígeno utilizada durante la oxidación.

## II.2.2. DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Los ensayos de DQO son utilizados como parámetro para determinar la concentración de residuos domésticos e industriales, permitiendo medir la cantidad de oxígeno que se necesita para la oxidación total de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua de la siguiente manera:



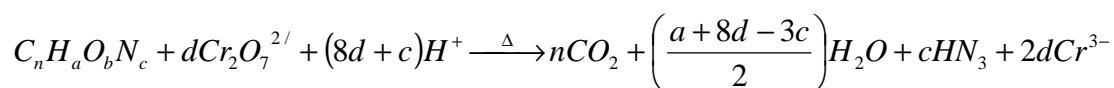
Las pruebas de DQO se centran en la oxidación de todos los compuestos orgánicos por la acción de agentes oxidantes fuertes en condiciones ácidas, con excepción de unos pocos compuestos; por ejemplo, los nitrógenos aminados (con número de oxidación de -3) se convierten a nitrógeno amoniacal, como se

indica en la ecuación anterior; sin embargo, el nitrógeno orgánico en estados más altos de oxidación se convierte a nitratos.

En conjunto con la DBO, la DQO es útil para indicar las condiciones tóxicas y la presencia de sustancias orgánicas biológicamente resistentes. Es muy utilizada también para la ejecución de medidas de tratamiento en sustitución de la de DBO, debido a la velocidad con que se obtienen los resultados, que es de aproximadamente unas tres horas, en vez de los cinco días que requiere una determinación de la DBO.

En general, los valores que se obtienen de un ensayo de DQO son mayores que los que se obtienen en las pruebas de DBO; esto sucede dado que durante la determinación de la DQO, la materia orgánica es convertida a dióxido de carbono y agua, independientemente de la capacidad biológica de las sustancias para ser asimiladas; por tanto, al no poderse diferenciar entre materia biológicamente oxidable y materia orgánica biológicamente inerte, es imposible cuantificar la proporción de datos sobre la velocidad a la que el material biológicamente activo se estabiliza en las condiciones existentes en la naturaleza.

Para los ensayos de DQO, se utiliza dicromato de potasio como agente químico oxidante, ya que se ha demostrado, a lo largo de pruebas, que es bastante práctico, además oxida una gran variedad de sustancias orgánicas; su exceso se puede medir con facilidad, es relativamente poco costoso, y se puede encontrar en alto estado de pureza. La ecuación que generalmente ocurre cuando este compuesto oxida el nitrógeno orgánico en estado reducido (número de oxidación -3) generalmente se representa de la siguiente forma:



donde 
$$d = \frac{2n}{3} + \frac{a}{6} - \frac{d}{3} - \frac{c}{2}$$

La DQO máxima permitida por nuestra normativa para vertido y reuso de aguas residuales es de 150 mg/l, para vertido en cuerpos receptores y de 750 mg/l para vertido en alcantarillados sanitarios; sin embargo, dependiendo de dónde provengan las aguas residuales, la norma da otros valores para la DQO.

## **II.3. PARÁMETROS QUÍMICOS**

### **II.3.1. CONDUCTIVIDAD**

El determinar el valor de conductividad, en las aguas, colabora a conocer el grado de contaminación que tiene; este parámetro de control químico mide la actividad eléctrica de los iones en dilución ( $\mu\text{Siemens/cm}$ ); se hace mediante una modelación matemática muy simple de contaminante, puede ser en ríos, estuarios y lagos.

La conductividad está estrechamente relacionada con la cantidad de sólidos totales disueltos en el agua; esto significa que a mayor cantidad de sólidos, mayor será la conductividad; de igual manera sucede con la contaminación: a mayor grado de contaminación en el agua mayores serán los valores de conductividad.

La relación entre los sólidos disueltos y la conductividad puede describirse de la siguiente forma:

$$500 \text{ ppm} = 1000 \text{ mS/cm} \text{ ó } 1 \text{ EC}$$

Por otra parte, la temperatura del agua afecta a la conductividad eléctrica, de forma que su valor aumenta de un 2 a un 3 % por grado Celsius.

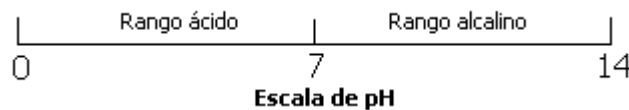
### II.3.2. POTENCIAL DE HIDRÓGENO-pH

El pH es un término de expresión para la magnitud de acidez o alcalinidad. Representa la concentración de iones hidrógeno.

El pH debe controlarse y mantenerse dentro de un rango favorable para el desarrollo y desempeño adecuado de los organismos que intervienen en el proceso, principalmente en los tratamientos de aguas.

El término pH se representa generalmente como:  $pH = -\log\{H^+\}$  o  $pH = \log \frac{1}{H^+}$ . La escala de pH usualmente oscila entre 0 y 14, y la neutralidad absoluta de pH se considera para un valor de 7 a 25°C.

Figura 4. Escala de pH.



Fuente: Sawyer, 2001.

Las mediciones de pH se realizan de forma estándar mediante un electrodo de vidrio. Las aguas residuales deben tener rangos de pH entre 6 y 9 para vertido al alcantarillado sanitario, y entre 5 y 9 para vertido a cuerpos de agua, según el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales. Para el caso de las bacterias, casi todas muestran un crecimiento óptimo en un intervalo de pH de 6.5 a 7.5, con límites máximos de crecimiento entre 4.0 y 10.0.

Las actividades metabólicas de las bacterias causan cambios en el pH de su medio; por tanto, el medio debe tener una capacidad amortiguadora para neutralizarlos, como condición para que el crecimiento continúe durante un periodo largo. (Rittmann, 2001)

### **II.3.3. FÓSFORO**

El fósforo unido de forma estructural tiene muy poca importancia para la ingeniería ambiental; sin embargo, lo que realmente interesa son los fosfatos en sus formas moleculares deshidratadas, conocidos como polifosfatos o fosfatos condensados.

En algunos abastecimientos de agua públicos, se utilizan los polifosfatos como medio para controlar la corrosión y, en algunas aguas ablandadas, para estabilizar el carbonato de calcio, con el fin de eliminar la necesidad de recarbonación.

Algunos compuestos como el fósforo, al igual que el nitrógeno, son esenciales para el crecimiento de organismos como algas y cianobacterias; el controlar estos elementos es usualmente el factor que determina su tasa de crecimiento. El nivel crítico para el fósforo inorgánico ha sido establecido entre 0.005 mg/l y 5 µg/l en condiciones de crecimiento en verano.

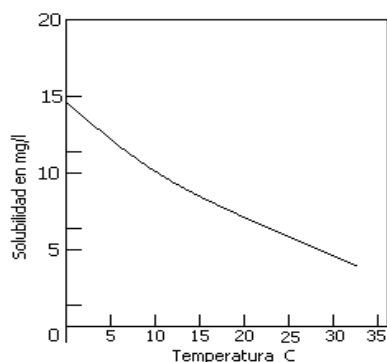
En el caso de las aguas residuales domésticas, los contenidos de fósforo son altos. El reglamento costarricense no regula la cantidad de fósforo total; sin embargo, la cantidad máxima de fosfatos permitida es 25 mg/l para vertido en alcantarillados sanitarios y cuerpos receptores de agua, y con valores superiores a este se tendrán superpoblaciones de algas y plantas verdes en el agua, provocando un aumentado consumo de oxígeno presente en el agua y posterior deterioro de la calidad del agua.



### II.3.4. OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno es un gas con una solubilidad en agua bastante baja; esta varía directamente con la presión atmosférica a cualquier temperatura; por lo tanto, el contenido de oxígeno en condiciones de saturación a una temperatura dada puede calcularse mediante la ley de Henry. La siguiente figura muestra la curva de solubilidad del agua en agua con bajo contenido de sólidos y en equilibrio con el aire. La solubilidad es menor en aguas salinas (Sawyer, 2001).

Figura 5. Solubilidad del Oxígeno en el agua destilada saturada con aire a 760 mm Hg.



Fuente: Sawyer, 2001.

La velocidad de oxidación biológica aumenta con la temperatura y la demanda de oxígeno aumenta simultáneamente; es por esto que la variación de solubilidad del oxígeno con la presión es una consideración importante en la ingeniería ambiental.

En la práctica de ingeniería ambiental, las condiciones críticas relacionadas con deficiencias de oxígeno disuelto ocurren con mayor frecuencia en los meses de verano, cuando la temperatura es alta y la solubilidad del oxígeno es mínima; se considera que el nivel máximo de oxígeno disuelto disponible en condiciones críticas es aproximadamente 8 mg/l. (Sawyer, 2001)

En los desechos líquidos, el OD determina el tipo de organismo, aeróbico o anaeróbico, que produce los cambios biológicos. Los organismos aeróbicos usan

oxígeno libre para oxidar la materia orgánica e inorgánica y forman productos finales inocuos; mientras que los anaeróbicos llevan a cabo la oxidación mediante la reducción de algunas sales inorgánicas como sulfatos y los productos finales generalmente son muy perjudiciales. (Sawyer, 2001)

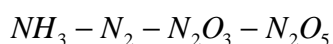
Cuando se tienen tratamientos biológicos aeróbicos de aguas residuales, la presencia de baja solubilidad del oxígeno determina el costo de la aireación al aplicar el proceso; es por esto que en tratamientos de este tipo es importante controlar las condiciones aeróbicas para que los organismos sobrevivan en un ambiente óptimo y, por tanto, no proliferen los organismos anaeróbicos generando condiciones nocivas.

El oxígeno disuelto residual de un sistema medido a diferentes intervalos de tiempo permite calcular la velocidad de la oxidación bioquímica.

### **II.3.5. NITRÓGENO**

Los compuestos de nitrógeno tienen gran importancia en los procesos vitales de plantas y animales; este elemento puede tomar diferentes estados de oxidación que pueden ser inducidos por organismos vivos, en particular por bacterias; estos cambios pueden ser positivos o negativos dependiendo de que las condiciones predominantes sean aeróbicas o anaeróbicas (Sawyer, 2001).

El nitrógeno puede existir en varios estados de oxidación; en los sistemas acuáticos predominan unos pocos de estos, que son de gran importancia en cuanto a la calidad del agua se refiere; estos son:



El contenido de Nitrógeno en el agua es utilizado como indicador del tiempo en que esta fue contaminada. Aguas con contaminación reciente presentan la mayor parte del nitrógeno como nitrógeno orgánico (proteínas) y amoníaco. Al pasar el tiempo, el nitrógeno orgánico se convierte gradualmente en nitrógeno

amoniaco y, posteriormente, si existen condiciones aeróbicas, ocurre la oxidación del amoniaco a nitritos y nitratos. Por lo tanto, aguas con contenidos principalmente de nitrógeno amoniacal y orgánico se sabe que han sido contaminadas recientemente y, por tanto, presentan un alto potencial de peligro; en cambio, las aguas en que la mayor parte de nitrógeno se encuentra como nitratos habían sido contaminadas con mucha anterioridad y, por ende, representan poco riesgo para la salud pública. Además, se ha demostrado que las aguas potables con altos contenidos de nitratos usualmente causan metahemoglobinemia en niños (Sawyer, 2001).

Estas pruebas no generan un resultado real de la cantidad de contaminación del agua; sin embargo, sirve como una idea preliminar. Si se desea una cuantificación real de la cantidad de contaminante, se requiere hacer pruebas bacteriológicas de organismos coliformes.

La cantidad de nitrógeno permisible en el agua se encuentra regulada en el Reglamento de vertido, como nitrógeno total, y no debe ser superior a 50 mg/l, ya sea si se vierte en alcantarillado sanitario o cuerpo receptor.

#### **II.3.5.1. Nitritos**

Al encontrarse el nitrito en el agua, indica la presencia de cantidades de nitrógeno parcialmente oxidado.

Generalmente, el nitrógeno en forma de nitrito se encuentra en concentraciones muy bajas, menores a 1 mg/l, incluso en efluentes de plantas de desechos industriales. En aguas superficiales y profundas, su concentración es bastante menor que 0.1 mg/l (Sawyer, 2001).

Cantidades de 0.5-1 g de nitrito producen en el ser humano intoxicaciones ligeras; de 1-2 g intoxicación grave, y 4 g intoxicación mortal. Existen casos en los que se han producido intoxicaciones debido a una cantidad excesiva de

nitrito sódico en las carnes en conserva, principalmente debido a una mala homogeneización entre ingredientes y aditivos. Por ello, la sal para salazones no debe nunca contener más de 0.5-0.6% de nitrito sódico, y la cantidad de sal empleada no debe sobrepasar los 15 mg por cada 100 g de carne tratada. (Vidal, 2006)

Es riesgoso en el caso de mujeres embarazadas, ya que el nitrito atraviesa la placenta, causando metahemoglobinemia fetal, o personas con acidez gástrica disminuida o con déficit de glucosa-6P-deshidrogenasa.

### **II.3.5.2. Nitratos**

El contenido de nitrato indica oxidación total o estabilidad del nitrógeno presente; por esto es característico de las aguas contaminadas con cierta antigüedad que el oxígeno presente se encuentre en forma de nitratos (Sawyer, 2001).

En la naturaleza, los depósitos geológicos y la vegetación en descomposición son las fuentes naturales de nitratos. También realizan su aporte de nitratos los fertilizantes y sistemas sépticos. Otra fuente de contaminación de los pozos y mantos acuíferos que se utilizan para el abastecimiento de aguas potables se da por el arrastre de nitratos a través del suelo, por medio de la lluvia o el riego.

Los niveles de nitratos en el agua potable pueden ser un indicador de la calidad del agua en general. Los niveles elevados de nitratos pueden sugerir la posible presencia de otros contaminantes, tales como microorganismos o pesticidas, que podrían causar problemas de salud. Los niveles altos de nitratos en el agua potable pueden causar una enfermedad potencialmente fatal en los infantes. Esta enfermedad se llama el "síndrome del bebé azul" o metahemoglobinemia. Aunque esta enfermedad puede ocurrir en cualquier edad, el agua contaminada con nitratos principalmente puede causarla en niños menores de seis meses. Los infantes tienen más riesgo de adquirir metahemoglobinemia que los niños

mayores y los adultos, porque tienen una acidez estomacal más baja, lo que permite el crecimiento de ciertos tipos de bacterias en el estómago y los intestinos (Sawyer, 2001).

Por lo general, los envenenamientos en infantes se dan cuando se utiliza agua contaminada para preparar la fórmula y los alimentos infantiles; por otra parte, al hervirse el agua para preparar la fórmula se destruyen las bacterias, pero no los nitratos.

Por lo general, los síntomas de la metahemoglobinemia pueden ser muy leves; un niño que haya contraído la enfermedad de forma leve o moderada puede sufrir letargo (sueño profundo y continuo), diarrea y vómito; esto puede confundir a los médicos y dar un diagnóstico erróneo, como un estado nutricional pobre o un trastorno estomacal. Aunque la metahemoglobinemia se diagnostica fácilmente a partir de un análisis de sangre, frecuentemente se reconoce cuando ya está en etapas agudas cianóticas, cuando el niño adquiere un color café azulado (este signo puede no notarse en niños con piel oscura) y tiene dificultad para respirar.

Una vez diagnosticada la enfermedad, si la condición no amenaza la vida del paciente, el único tratamiento necesario es comenzar a tomar agua no contaminada. Los síntomas mejorarán en dos o tres días. En el caso de niños gravemente afectados, se necesitará un tratamiento intravenoso con azul de metileno, que convertirá a la metahemoglobina en hemoglobina, ocasionando una rápida mejoría.

El reglamento de vertido no cuenta con norma para este parámetro; no obstante, el Saneamiento Ambiental establece que para cantidades de nitrato superiores a 10ppm, se tendrán superpoblaciones de algas y plantas verdes en el agua, provocando un aumentado consumo de oxígeno presente en el agua y posterior deterioro de la calidad del agua. El cumplimiento de estas normas es

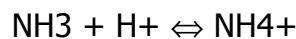
iniciativa de la Universidad EARTH, en procura del cumplimiento de sus políticas ambientales. (Vidal, 2006)

La U.S. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) ha establecido un estándar de nitrógeno para el agua potable, que es de 10 mg por litro de nitrato-N. (Vidal, 2006)

### **II.3.5.3. Nitrógeno amoniacal**

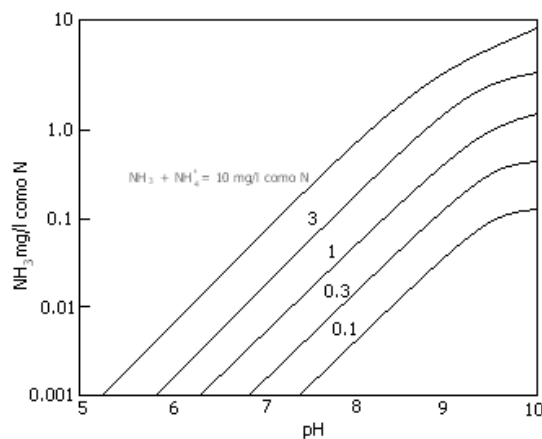
El nitrógeno amoniacal representa el nitrógeno presente como hidróxido de amonio y sales amoniacales; su concentración disminuye con el paso del tiempo o a medida que el tratamiento de las aguas avanza (Sawyer, 2001).

Todo el nitrógeno que existe como ión amonio o en el siguiente equilibrio se considera nitrógeno amoniacal.



En la siguiente figura, se representa la relación que existe entre el amoniaco no ionizado y el ión amonio, para varias relaciones de concentración de nitrógeno amoniacal.

Figura 6. Relación entre amoniaco e ión amonio para diferentes concentraciones de nitrógeno amoniacal y pH.



Fuente: Sawyer, 2001.

Para los cuerpos receptores, lo que más interesa es el valor del pH y el control del amoníaco, buscando la eliminación del ión de amonio, dado que es tóxico; no obstante, la limitación se da dependiendo de la cantidad de nitrógeno total que exista en el efluente.

Hay que tener sumo cuidado con las concentraciones que presenten los cuerpos de aguas, dado que concentraciones alrededor del 0.2 mg/l de nitrógeno amoniacal, causan muerte en algunas especies de peces; es por esto que en algunos países como Estados Unidos no se permiten valores mayores de 0.002 mg/l de amoníaco libre en los cuerpos de agua.

#### **II.4. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS**

El estudio de los microorganismos y de sus actividades se realiza por medio de la microbiología, que significa: micros: pequeño, y logos: vida. En la ingeniería ambiental, lo que se busca son los microorganismos relacionados con el agua, el agua residual, el aire y el suelo; además, que sean capaces de perjudicar la salud pública, así como la descomposición orgánica, o desempeñar una función útil en los sistemas de tratamiento.

En cualquier lugar donde se presenten las condiciones óptimas de humedad, temperatura y alimento para que se dé el adecuado desarrollo de los microorganismos, ellos sobrevivirán. Un sitio idóneo para que se dé el desarrollo de un sinnúmero de microorganismos son las aguas residuales, sobre todo bacterias. La mayoría de estos microbios son inofensivos y se pueden emplear en procesos biológicos para transformar materia orgánica en productos finales estables; sin embargo, también existen en estas aguas organismos patógenos, causantes de enfermedades susceptibles a transmitirse en el agua contaminada.

Los microorganismos pueden clasificarse, según su estructura celular, en protistas procariontas, eucariotas y virus.

## II.4.1. EUCARIOTAS

Son organismos superiores unicelulares o multicelulares con núcleo verdadero y se subdividen en: protozoarios, hongos y algas.

### II.4.1.1. Hongos

Los hongos son protistas superiores (eucariotas) no fotosintéticos; pueden ser unicelulares o multicelulares, con la capacidad de sobrevivir en condiciones de pH bajo. Son útiles en el tratamiento biológico de ciertos residuos industriales y en la transformación de desechos orgánicos sólidos en abono. Se dividen en tres grupos:

- **Mohos:** son hongos filamentosos, que se desarrollan en forma de largas estructuras con apariencia de hilo y se les llama hifas; pueden llegar a formar una masa llamada micelio, por el que pueden absorber nutrientes disueltos y forman estructuras reproductivas.
- **Levaduras:** hongos no filamentosos; son organismos unicelulares mucho más grandes que las bacterias (de 1 a 5  $\mu\text{m}$  de ancho y de 5 a 30  $\mu\text{m}$  de largo); en general, tiene formas ovoide, esférica o elipsoidal. Al ser facultativas, pueden crecer tanto en forma aerobia como anaerobia. Estos organismos se emplean en una amplia variedad de procesos fermentativos (para hacer vino, cerveza, pan); además, para sintetizar algunas vitaminas, grasas y proteínas a partir de azúcares sencillos y nitrógeno amoniacal.
- **Setas:** Son del tipo filamentosos que constituye el cuerpo de las partes comestibles de las setas. Muchas de las setas crecen en materia orgánica muerta en el suelo o sobre troncos de árboles.



Generalmente, los hongos son aerobios y saprofitos (se alimentan de materia orgánica en descomposición). También son capaces de utilizar una amplia variedad de sustancias orgánicas complejas como fuentes de alimento; por sus características son más tolerantes a las condiciones ácidas que los demás microorganismos.

Cuadro 2: Clasificación de los hongos acuáticos y del suelo.

<b>Tipo</b>	<b>División</b>	<b>Características/ejemplos</b>
Mohos (filamentosos)	Ficomycetos	Esporas sexuales o asexuales; Mucor, Rhizopus.
	Hongos imperfectos	Ningún estadio sexual; Penicillium, Aspergillus
Levaduras (no filamentosos)	Ascomycetos	Esporas sexuales en sacos; Neurospora, Candida
Setas (macroscópicos)	Basidiomycetos	Estadio sexual en los bacilos, champiñones comunes

Fuente: Vidal, 2006

#### **II.4.1.2. Algas**

Con excepción de las algas azules, las algas tienen un núcleo discreto rodeado de una membrana nuclear, por lo que se clasifican como eucariotas (Aguamarker, 2009).

El tamaño puede variar desde fitoplancton unicelular (con forma esférica, cilíndrica, parecida a un palo o en espiral) microscópico hasta grandes algas marinas multicelulares; estas colonias multicelulares pueden formar filamentos o tubos largos, o integrar masas de células individuales adheridas unas con otras. Estas colonias superficialmente se parecen a las plantas superiores.

Las algas son productores primarios importantes en la cadena alimenticia acuática; no obstante, pueden constituir un problema en los sistemas de provisión de agua, ya que aportan sabores y olores, tapan tomas de agua, acortan el trayecto de los filtros y causan una alta demanda de cloro.

Cuadro 3: Clasificación de las algas.

<b>División</b>	<b>Color</b>	<b>Ambiente/comentarios</b>
Clorofitos	Verde hierba	Agua dulce; principalmente algas de aguas limpias, filamentosos.
Crisofitos	Verde amarillento	Agua limpia y fría.
Pirrofitos	Pardo amarillento	Principalmente marinas; presentan 2 flagelos.
Euglenofitos	Verde	Agua dulce; requieren nitrógeno orgánico, motilidad por flagelos.
Rodófitas	Rojo	Principalmente marinas; agua cálida muy limpia.
Fiofitos	Pardo	Marinas; agua fría, grandes
Cianofitos	Verde azulado	Agua dulce, calida, con frecuencia contaminada; fijadores de nitrógeno, suelen formar floraciones algaceas.

Fuente: Vidal, 2006

### **II.4.1.3. Protozoarios**

En orden de magnitud, los protozoarios son más grandes que las bacterias; son los organismos unicelulares más especializados y son útiles en algunos procesos del tratamiento biológico (AYMA, 2009).

El tamaño puede variar desde pocos hasta varios cientos de micras. Estos organismos existen en casi todos los hábitats donde hay humedad ampliamente distribuidos; pueden ser saprofitos (obteniendo alimento en forma disuelta); son depredadores de bacterias y algunos de ellos son parásitos capaces de causar enfermedades en animales y humanos.

Cuadro 4: Clasificación de las protozoarios comunes acuáticos y de suelo.

<b>División</b>	<b>Características/ejemplos</b>	<b>Ejemplos</b>
Seudópodos (sarcodina)	Motilidad por pseudópodos.	Amoeba, Entamoeba.
Flagelados Mastigophora)	Motilidad por flagelos, muchos fotosintéticos.	Euglena, Volvox, Giardia.
Ciliados (Ciliophora)	Nadan libremente, motilidad por cilios que se mueven al unísono.	Paramecium
Protozoarios parásitos (Suctoría) (Sporozoa)	Ciliados de nado libre al principio del ciclo vital, tentáculos en estado adulto.	
	Generalmente sin motilidad, rara vez viven libres, parásitos	Plasmodium.

Fuente: Vidal, 2006

#### **II.4.1.4. Virus**

Este tipo de microorganismo es de menor tamaño que las bacterias; también pueden causar enfermedades en plantas, animales y seres humanos; los más pequeños tienen un tamaño de 10 a 250 nm, unas cien veces más pequeños que una bacteria pequeña.

Estos organismos no contienen enzimas internas y, por tanto, no pueden crecer o metabolizar por cuenta propia; son parásitos obligados que infectan los tejidos de bacterias, plantas, animales y humanos.

Basándose en muchos estudios, se ha considerado que los virus no son organismos vivos, pero sí tienen la capacidad de reproducirse o replicarse dentro de las células huéspedes.

Los virus tienen la capacidad de sobrevivir fuera de una célula huésped largo tiempo, entre una infección y otra, y solo se les puede matar alterando sus estructuras moleculares.

#### **II.4.2. PROCARIOTAS**

Los procariotas, a diferencia de los eucariotas, son organismos inferiores que carecen de núcleo, incluyen bacterias y algas azules o cianobacterias (Aguamarker, 2009).

##### **II.4.2.1. Bacterias**

Las bacterias son organismos microscópicos unicelulares, forman el grupo de microorganismos más importante y son indispensables para el ciclo de nutrientes del ecosistema. Se les puede encontrar en el agua, las aguas residuales, el suelo, el aire, los alimentos, las plantas (frutos, vegetación), animales y humanos (piel, tracto intestinal) (Rittmann, 2001).

Además de las bacterias patógenas, causantes de enfermedades, existen muchas otras importantes en los procesos de tratamiento de agua y de aguas residuales, en la autopurificación natural de corrientes y lagos y en la descomposición de los materiales en rellenos sanitarios, suelos y montículos de abono (Henry, 1999).

Dependiendo de la forma, el tamaño, la estructura y disposición celular, las bacterias se pueden clasificar de diferentes tipos. En el caso de la forma, se pueden dividir en tres: Cocos, de forma esférica, Bacilos, de forma cilíndrica o de bastón y Espirilos, con forma de espiral.

Según el tamaño, la mayor parte de las bacterias varían de 0.5 a 5.0  $\mu\text{m}$  de largo y de 0.3 a 1.5  $\mu\text{m}$  de ancho. En especial, los cocos tienen alrededor de 0.1  $\mu\text{m}$  de diámetro. Por otra parte, es importante saber que todas las bacterias tienen una pared rígida que conserva la forma de la célula y protege su contenido de la presión osmótica.

Entre las especies de bacterias existen amplias variaciones en cuanto a necesidades de nutrición y a condiciones físicas capaces de soportar. Ciertas bacterias crecen a temperaturas inferiores a 0°C, mientras otras toleran 99°C. Algunas requieren oxígeno atmosférico, en tanto que para otras su presencia constituye un impedimento de vida (Henry, 1999).

De acuerdo con sus fuentes de energía y de carbono, las bacterias se dividen en dos grandes grupos:

- **Bacterias Heterótrofas:** Obtienen su energía y carbono de un compuesto orgánico o de materia orgánica (Rittmann, 2001).
- **Bacterias Autótrofas:** Necesitan dióxido de carbono como fuente de carbono y obtienen su energía de la luz solar (fotoautótrofos) o por oxidación de compuestos químicos inorgánicos (quimioautótrofos) (Rittmann, 2001).

### CAPÍTULO III

#### UBICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LAS QUE SE OBTUVIERON LAS MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES

Para el proyecto, se utilizaron tres tipos de muestras, todas de zonas que cuentan con características similares de humedad y temperatura.

##### **III.1. MUESTRA 1: TENERÍA**

La tenería se encuentra en Alajuela, aproximadamente a 15 kilómetros de San José y a 5 minutos del Aeropuerto Juan Santamaría. Tiene un área total de 24,000 m<sup>2</sup> y una capacidad de producción de 1,000,000 p<sup>2</sup> por mes.

Figura 7: Ubicación aérea de Tenería.

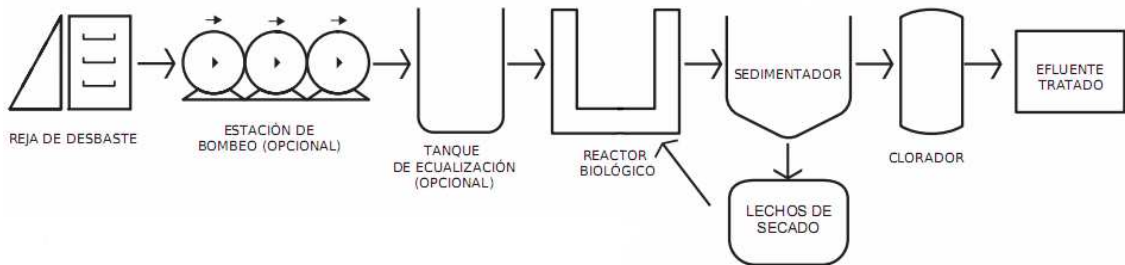


Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), consultado: 11 de septiembre, 2009.

La producción de la empresa se basa en un 70% de pieles frescas de Costa Rica y 30% de pieles importadas, a las que se les debe limpiar; por lo que se genera gran cantidad de agua con residuos de piel en descomposición y pelo de las bestias.

La tenería trata las aguas residuales en una planta de tratamiento de aguas con aireación extendida, con una distribución como la que se observa en la Figura 8, que cuenta con un avanzado equipo de hidráulica y tratamiento biológico; lo que permite operar con una eficiencia mayor al 98%, aprobando así, que el efluente resultante cumpla con la normativa nacional de vertido y reuso de aguas residuales. A continuación se presenta un esquema con la distribución del tanque de operación de la planta y fotos del sitio.

Figura 8: Esquema de planta de tratamiento de aguas residuales con aireación extendida.



Fuente: [www.hidrocaven.com](http://www.hidrocaven.com), consultado: 10 de septiembre, 2009.

Figura 9: Reactor Biológico, Sedimentador y Sección inicial de la planta, respectivamente.



Fuente: [www.primenca.com](http://www.primenca.com), consultado: 10 de septiembre, 2009

Los niveles más altos en el efluente que ha reportado la planta están muy por debajo de la legislación nacional y son: DBO5 16 mg/l, DQO 135 mg/l, Cromo < 1.2 mg/l y Sulfuros < 0.05 mg/l. La capacidad es de 850(m<sup>3</sup>/d) metros cúbicos diarios.

Para el caso específico del proyecto, todas las muestras fueron tomadas del tanque del reactor biológico, dado que es en el que hay mayor concentración de microorganismos.

### **III.2. MUESTRA 2: BENEFICIO**

El Beneficio de Café se encuentra a unos dos kilómetros, del cruce de la Panasonic en San Antonio de Santa Ana, como se observa en las siguientes figuras.

Figura 10: Foto aérea del Beneficio.



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), consultado: 11 de septiembre, 2009.



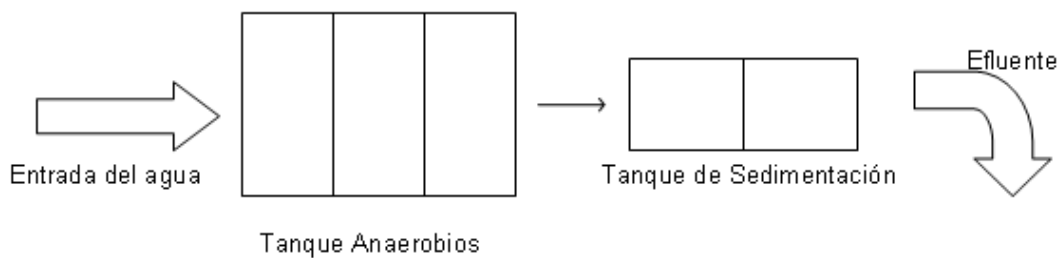
Figura 11: Fotografías de la entrada al Beneficio, las instalaciones y la planta de tratamiento de las aguas residuales, respectivamente.



Fuente: La autora.

El Beneficio cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales de filtro anaerobio de flujo ascendente, que está seccionada en tres tanques por los que pasa el agua y posteriormente es vertida a un tanque de sedimentación antes de verterla al cuerpo de agua, como se representa en el siguiente esquema:

Figura 12: Esquema Planta de Tratamiento del Beneficio



Fuente: La autora.

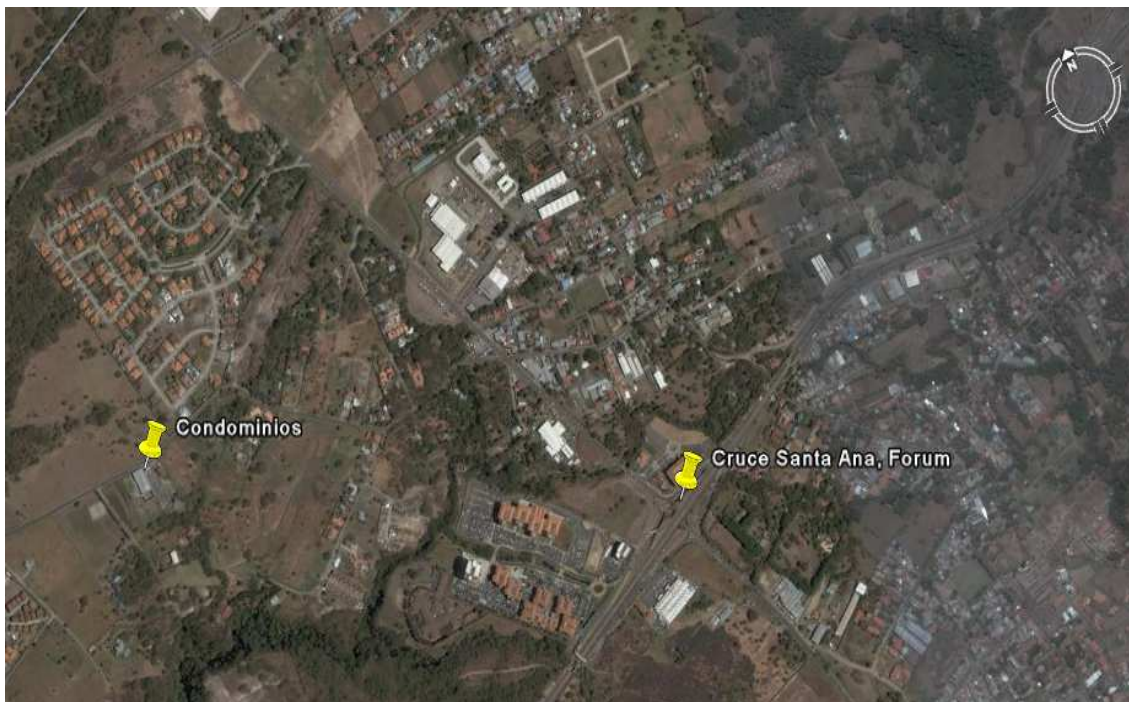


Las muestras de aguas que se utilizaron para las pruebas físico-químicas, microbiológicas y para los reactores anaerobios y aerobios, fueron captadas de los tanques anaerobios, donde se da el proceso biológico de la planta.

### **III.3. MUESTRA 3: CONDOMINIOS**

Los Condominios se encuentran ubicados a cinco minutos del centro de Pozos de Santa Ana; cuentan con veintiséis casas de dos niveles cada una. Es una única calle en forma de herradura alrededor de la cual se distribuyen las viviendas, como se observa en las siguientes fotografías:

Figura 13: Foto aérea de los Condominios.



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), consultado: 11 de septiembre, 2009

Figura 14: Fotografías de la entrada e interior del Condominio Boulevard del Sol, respectivamente.



Fuente: La autora.

El Condominio cuenta con una planta de tratamiento para las aguas servidas del tipo de lodos activados, la que permanentemente pasa aireada por una bomba, lo que inhibe los olores indeseados. En el sitio lo único que está a la vista son tres tapas de los tanques y una pequeña caseta donde se encuentra el equipo de aireación. En la siguiente figura se observa el tanque, del que fueron tomadas las muestras para las pruebas del proyecto.

Figura 15: Planta de tratamiento del Condominio.



Fuente: La autora.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS Y LA OBTENCIÓN DE LOS RESULTADOS FINALES DE LAS TRES DIFERENTES MUESTRAS DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO**

En el caso de la descripción de las pruebas físico-químicas, la información fue tomada del Manual del Laboratorio de Ingeniería Ambiental y del aporte del Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas, para el caso de las pruebas microbiológicas.

#### **IV.1. PROCEDIMIENTO UTILIZADO EN LAS PRUEBAS DEL LABORATORIO**

A continuación se presenta un resumen de los pasos seguidos durante el desarrollo de cada una de las pruebas físicas, químicas y microbiológicas.

##### **IV.1.1. PRUEBAS FÍSICAS**

###### **IV. 1.1.1. Sólidos totales (ST)**

Para esta prueba se debe pesar una cápsula de porcelana (Peso inicial); posteriormente se coloca 100 ml de muestra; seguidamente se pone en un horno a secar 24 horas, como se observa en la figura:

Figura 16: Horno para prueba de Sólidos Totales.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

Una vez transcurrido el tiempo, se saca la muestra y se deja enfriar por media hora; por último, se pesa nuevamente la cápsula con lo que quedó de la muestra (Peso final). El peso de los sólidos totales se obtiene de la diferencia de pesos como:  $\text{Peso}_{ST} = \text{Peso } f - \text{Peso } i$

#### **IV.1.1.2. Sólidos sedimentables**

Al determinar los sólidos sedimentables, se debe llenar un cono Imhoff con un litro de muestra; en completo reposo se espera una hora y posteriormente se mide la cantidad de sólidos que se han sedimentado en la escala del cono; el resultado obtenido es en ml/ml.

Figura 17: Conos de Imhoff.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

#### **IV.1.1.3. Sólidos disueltos**

Los sólidos disueltos se contabilizan por medio de un aparato electrónico (TDS meter), por lo que se debe colocar suficiente muestra en un *beaker* de 250 ml o más; se sumerge la probeta del aparato en la muestra, asegurándose que los agujeros estén cubiertos y los resultados se leen directamente del aparato; como se observa en la siguiente figura.

Figura 18: Prueba de Sólidos disueltos.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

#### **IV.1.1.4. Sólidos filtrables**

En la prueba de sólidos filtrables se debe pesar una cápsula de porcelana. (Peso inicial). La muestra de campo debe hacerse pasar por un papel de filtro hasta obtener 100 ml de muestra filtrada; el volumen obtenido se coloca en la cápsula y se deja secar por 24 horas en el horno, como se observó en la Figura 6. Una vez transcurrido el tiempo, se saca la cápsula, se deje enfriar por 30 minutos y se pesa nuevamente. (Peso final).

Los sólidos filtrables se obtiene de la diferencia de pesos como:

$$\text{Sólidos Filtrables} = Pf - Pi$$

#### **IV.1.2. PRUEBAS QUÍMICAS**

##### **IV.1.2.1. Procedimiento de la prueba de Fósforo**

En esta prueba, es necesario utilizar el colorímetro y para ello se debe colocar el módulo 81.01 y buscar el número 81.02.1. Para realizar la lectura de fósforo en el agua residual se necesita poner 10 ml de muestra y añadirse un sobre de Phosphate Power (PhosVer 3); se tapa el recipiente y se agita fuertemente. Se da un periodo de dos minutos. Al mismo tiempo, se debe llenar otro recipiente con 10 ml de muestra simple sin agregar reactivo; con esta muestra patrón se

calibra el colorímetro poniéndola y oprimiendo cero. Una vez realizado esto, se coloca la muestra y se realiza la lectura en mg/l

A continuación, se presenta la imagen del modelo de colorímetro que se utilizó en cada una de las pruebas:

Figura 19: Colorímetro.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

#### **IV.1.2.2. Nitratos**

La determinación de nitratos se realiza colocando en el colorímetro el módulo 50.01 del cual se busca el número 50.05.1. Para la prueba es necesario llenar dos botellitas con 10 ml de muestra; a una de ellas se debe agregar un sobre de Nitriver 5; se mezcla fuertemente durante un minuto y se deja reposar por un periodo de cinco minutos; al recipiente con la muestra sin reactivo, se le coloca en el colorímetro y se gradúa en cero, transcurrido el tiempo de la muestra tratada se procede a realizar la lectura en mg/l.

#### **IV.1.2.3. Nitritos**

Al igual que para la prueba de nitratos, se debe colocar en el colorímetro el número 50.08.1, del módulo 50.01. Para realizar las lecturas de nitritos es necesario llenar dos botellas; a una de ellas se le debe agregar un sobre de Nitriver 3; se debe tapar, agitar con fuerza y dejar reposar por 10 minutos; la



botella con muestra sin reactivo se calibra en cero y posterior al tiempo de reposo se realiza la lectura en mg/l de nitritos como nitrógeno ( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ). A continuación, se muestra un ejemplo de los sobres y botellitas que se utilizan para las pruebas de fósforo, nitritos y nitratos.

Figura 20: Elementos necesarios para pruebas de Fósforo, Nitritos y Nitratos.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

#### **IV.1.2.4. Nitrógeno amoniacal (Reactivo Nessler)**

De igual manera que se calibra el colorímetro para las pruebas de fósforo, nitritos y nitratos, se debe instalar el módulo 42.01 y buscar el número 42.05.1.

Para la determinación del nitrógeno amoniacal, se debe llenar una botella de 25 ml con agua destilada que será utilizada como blanco para calibrar el aparato, y la otra botella se llenará de muestra; a cada botella se le debe agregar tres gotas de estabilizador mineral y agitarlas; seguidamente se le agrega tres gotas de alcohol de polivinilo y de igual manera agitar. Con una pipeta se debe agregar 1 ml de Nessler Reagent, a cada mezcla, la que se tapaná y se invertirán para mezclar; se le debe dar un tiempo de un minuto.

Cuando se tienen las mezclas completas, se podrá realizar el calibrage del colorímetro con la mezcla de agua destilada y posteriormente a eso se realiza la lectura en mg/l de  $\text{NH}_3 - \text{N}$ . Los reactivos que se utilizan en esta prueba se observan en la siguiente fotografía.

Figura 21: Reactivos para la prueba de Nitrógeno Amoniacal.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

### **IV.1.3. PRUEBAS BIOQUÍMICAS**

#### **IV.1.3.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Antes de realizar la prueba de DQO, es necesario que se encienda el digestor de DQO; se debe colocar un interruptor en infinito y el otro interruptor en ajuste; se le da un periodo de 20 a 30 minutos hasta que la temperatura llegue a 150°C.

Una vez que el digestor esté en la temperatura adecuada, se procede a abrir los viales con el reactivo; es necesario inclinarlos 45°, para verter 0.2 ml de la muestra en uno y 0.2 ml de agua destilada (o 2 ml de cada uno de los líquidos) para utilizarla como patrón, ya con la muestra se cierran los viales y se agitan.

Cuando los viales estén listos, se deben colocar en el digestor, al cual se le debe colocar el controlador de temperatura en 150° y la otra perilla en TIME, y colocar el temporizador en 120 minutos. Cuando hayan transcurrido las dos horas, el digestor se apaga automáticamente.

Por último, se sacan los viales, se agitan y se les da un tiempo de 30 a 60 minutos, hasta que alcancen la temperatura ambiente; posteriormente se procede a realizar las lecturas del DQO en el colorímetro (debe tener el módulo 61.01 con el número 61.08.1) en mg/l.



Figura 22: Digestor de DQO y Colorímetro utilizados para pruebas de DQO.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

#### **IV.1.3.2. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

Al realizar la prueba del DBO, es necesario colocar un volumen de muestra dependiendo del rango de valores para el que se espera que oscilen los datos de DBO, como se observa en el siguiente cuadro:

Cuadro 5: Volúmenes de muestra dependiendo del rango de DBO.

<b>DBO muestra (mg/l)</b>	<b>Volumen de Muestra ml)</b>	<b>Factor</b>
0-40	432	1
0-80	365	2
0-200	250	5
0-400	164	10
0-800	97	20
0-2000	43.5	50
0-4000	22.7	100

Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental

Ya determinado el volumen de muestra, se debe colocar en una botella de DBO, como el de la Figura 13, además de un agitador magnético; en la boca de la botella se debe colocar una canasta en la que irán dos pastillas de NaOH.

Figura 23: Botellas para DBO.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental

Cuando la botella ya está lista se debe tapar con la cabeza de medición y ponerla sobre una base magnética. Es muy importante verificar que el agitador se encuentra girando.

Con el equipo, se debe iniciar el control del DBO y colocar las muestras en la incubadora por un periodo de cinco días, en los cuales se generarán los datos suficientes para determinar el DBO de la muestra y extrapolar datos para tiempos de retención de más días. A continuación, se ilustra lo mencionado anteriormente:

Figura 24: Equipo de control de datos e incubadora.



Fuente: Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.

## IV.1.4. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS

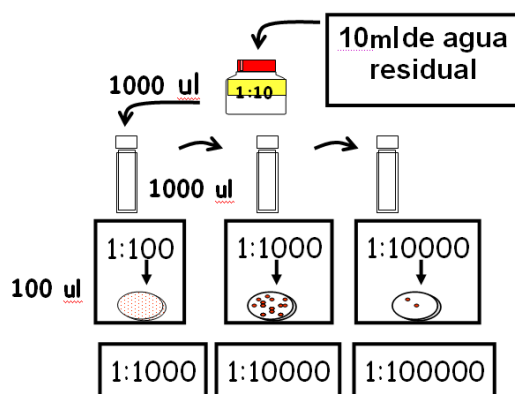
### IV.1.4.1. Recuentos de Microorganismos

En el caso de este tipo de pruebas, las muestras deben procesarse lo antes posible y mantenerse en el cubículo de procesamiento de muestras en el área destinada para ello.

Se debe pesar con una espátula limpia y seca, 10 ml de líquido y colocarlo en una botella que contenga 90 ml de agua destilada estéril.

En la cámara de transferencia, se hacen diluciones seriadas 1:10 de las muestras obtenidas por el proceso anterior; para ello se adiciona 1000  $\mu$ l de la muestra diluida al próximo tubo que contiene 9 ml de agua estéril. Se debe agitar utilizando un vortex. En cada una de las transferencias, debe cambiarse de punta; en la Figura 24 se muestra un esquema de la manera como se realizan las diluciones.

Figura 25: Esquema de diluciones de muestras.



Fuente: Procedimiento del Laboratorio de Microbiología Agrícola, Centro de Investigación Agronómica de la Universidad de Costa Rica.

Dependiendo de las diferentes diluciones que se transfieran por duplicado proporcionales de 100  $\mu$ l de cada dilución a los respectivos platos, con el medio

de cultivo por utilizar. Tanto las diluciones como el medio de cultivo dependen del microorganismo por evaluar. Se utiliza como referencia el Cuadro 6.

Cuadro 6: Medios de cultivo y diluciones por utilizar en los recuentos de diferentes microorganismos.

<b>Recuento</b>	<b>Dilución en tubo</b>	<b>Dilución en plato</b>	<b>Medio de cultivo</b>
Hongos	$10^2, 10^3, 10^4$	$10^3, 10^4, 10^5$	Martín
Bacterias	$10^3, 10^4, 10^5$	$10^4, 10^5, 10^6$	Albuminato de sodio
Actinos	$10^3, 10^4, 10^5$	$10^4, 10^5, 10^6$	Albuminato de sodio
Levaduras	$10^2, 10^3, 10^4$	$10^3, 10^4, 10^5$	Extracto de Malta
Fijadores de N	$10^3, 10^4, 10^5$	$10^4, 10^5, 10^6$	Fijadores de N
Solubilizadores de P	$10^3, 10^4, 10^5$	$10^4, 10^5, 10^6$	Solubilizadores
Lactobacillus	$10^1, 10^3, 10^5$	$10^2, 10^4, 10^6$	MRS; AN
Bacterias anaerobias	$10^1, 10^3, 10^5$	$10^2, 10^4, 10^6$	BUA; Agar tripticasa

Fuente: Procedimiento del Laboratorio de Microbiología Agrícola, Centro de Investigación Agronómica de la Universidad de Costa Rica.

#### **IV.1.4.2. Identificación de Bacterias**

Se hacen cultivos puros de la bacteria de interés (AN, KB; Mc conkey); a colonias aisladas se les realizan las siguientes pruebas:

- 1-Prueba Gram
- 2-Crecimiento en el medio TSI
- 3-Prueba de oxidasa.

A continuación, las bacterias se inoculan por rayado en medio agar nutritivo a temperatura ambiente o a la temperatura de crecimiento de la bacteria.

Utilizando un aplicador estéril se hace una suspensión de la bacteria en agua desionizada estéril y se iguala a un estándar de turbiedad conocida (son patrones de Biolog de acuerdo con el TSI y prueba Gram).

La suspensión bacteriana se inocula en una placa de BIOLOG que corresponde a GN si es Gram negativa, GP si es Gram positiva o GAN si es anaerobia.

Las placas se inoculan utilizando una pipeta multicanal; se incuban a 28°C y se leen dos veces al día utilizando el programa BIOLOG. Con el programa en funcionamiento, se escoge el tipo de microorganismo (GN, GP, AN) y se indica, en el caso de GN, si es entérico (TSI A/A), no entérico (TSI K/K, NC/K, NC/NC), y si es oxidasa, negativa o positiva.

En el caso de los Gram positivos, se indica si es un coco o un bacilo y si está o no esporulado (de acuerdo con los resultados del Gram). Se indica el tiempo de incubación.

Se consignan en el programa leyendo de izquierda a derecha las placas, cada una de las 8 filas de pozos, leyendo como positivos los pozos que presenten un viraje a morado (se anota 3), como negativos los que no presenten viraje (se anota 1) y como borde, los que presentan un color claro (se anota 2), considerado en el límite de positivo y negativo.

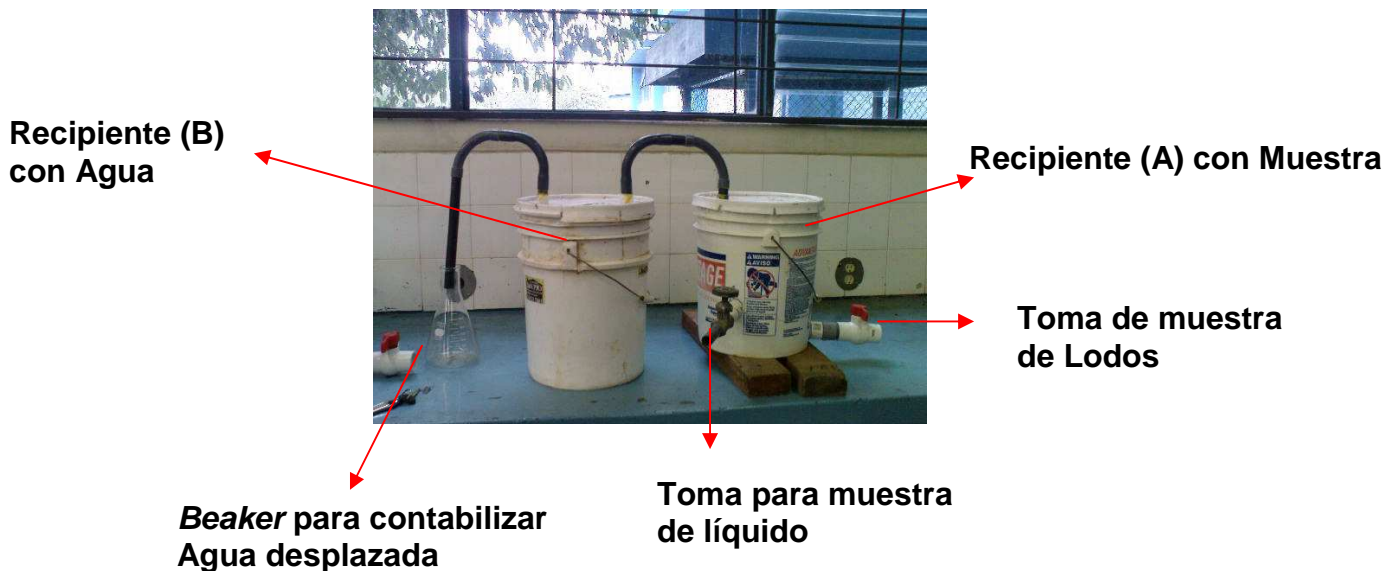
Las lecturas se realizan hasta que se presente un valor de 95% de probabilidad en la identificación del organismo o, en su defecto, se reporta el análisis en el nivel de género.

Es importante mencionar que las pruebas de Temperatura, pH, Oxígeno Disuelto y Conductividad, se efectúan mediante la lectura directa del aparato específico para realizar la medición, y se hace de igual manera como se ilustra en la Figura17 para los sólidos disueltos.

#### **IV.1.5. ESQUEMAS DE LOS REACTORES QUE SE UTILIZARON PARA SIMULAR LAS CONDICIONES ANAEROBIAS Y AEROBIAS EN EL LABORATORIO**

En el laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica, se preparó un espacio donde se montó un reactor anaerobio por cada una de las tres muestras de las aguas residuales de las plantas de tratamiento, como se observa a continuación.

Figura 26: Reactor Anaerobio.



Fuente: La autora.

La forma en que se dispuso el orden de los recipientes, buscaba poder contabilizar la cantidad de volumen de agua desplazado por el gas que se genera del proceso anaerobio en el recipiente A; sin embargo, a pesar de dársele un tiempo de retención de aproximadamente 40 a 50 días, para poder darle espacio de estabilización a los microorganismos de las muestras, no se logra contabilizar volumen de agua, para conocer así la cantidad de gas producido por el proceso.

Las muestras de los reactores anaerobios se tomaron únicamente de líquidos, para tener consistencia con las muestras que se obtuvieron directamente del

campo y que se llevaron inmediatamente al laboratorio, dado que eran únicamente aguas residuales; esto porque resultaba prácticamente imposible extraer lodos de los tanques de las tres diferentes plantas de tratamiento.

Ahora bien, para el caso del reactor aerobio, se utilizó el aparato electrónico "Digestor aeróbico W11" (Figura 27); este equipo proporciona una aireación constante y distribuida en toda el área del cilindro que contiene el agua. El equipo aerobio da la posibilidad de obtener agua filtrada una vez que ha sido aireada y agua que todavía se encuentre en el proceso. Para el análisis microbiológico de las muestras de los tres reactores, se analizaron los dos tipos de aguas.

Figura 27: Reactor Aerobio y acercamiento del minitanque que contiene el agua residual tratada, respectivamente.



Fuente: La autora.

## **IV.2. OBTENCIÓN DE RESULTADOS A PARTIR DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO PARA LAS AGUAS DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO Y CADA UNO DE LOS REACTORES ANAEROBIOS Y AEROBIOS**

### **IV.2.1. PRUEBAS FÍSICAS**

#### **IV.2.1.1. Sólidos**

De las cinco pruebas de sólidos (sólidos totales, sólidos sedimentables, sólidos disueltos, sólidos filtrables y sólidos volátiles) que se realizaron a las tres

muestras de agua, de las mediciones de cada una y por medio de diferencias, se encuentra el valor de los sólidos no filtrables; esto se puede apreciar en la Figura 2, como se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Sólidos no filtrables o sólidos suspendidos} = \text{Sólidos Totales} - \text{sólidos filtrables}$$

A pesar de poderse determinar, el valor de los sólidos no sedimentables no se calculó, dado que las normas costarricenses, los únicos valores de sólidos que contemplan son los de los sólidos suspendidos, disueltos y sedimentables, como se menciona en el capítulo II.

## **IV.2.2. PRUEBAS QUÍMICAS**

### **IV.2.2.1. Fósforo**

De la prueba de fósforo, la concentración que se obtiene en cada medición es en miligramos por litro (mg/l) de fosfatos, concentraciones que son reguladas por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, permitiendo como valor máximo 25 mg/l de fosfatos; no obstante, con la concentración de fosfatos se puede determinar la cantidad de fósforo total y fósforo reactivo como  $P_2O_5$ , al multiplicar por 0.326 y 0.747 respectivamente. Estos valores son importantes si las aguas residuales son vertidas en cuerpos receptores, dado que un valor elevado es indicador de alto crecimiento de algas y microorganismos que podrían incurrir en un consumo excesivo de oxígeno; esto es posible dado que el fósforo es nutriente.

### **IV.2.2.2. Nitratos y Nitritos**

Al determinarse la cantidad de nitritos y nitratos en las tres muestras de agua, el valor que se obtiene de la medición del colorímetro es el valor real de ambos compuestos, y se logra en concentraciones de miligramos por litro (mg/l).



### **IV.2.2.3. Nitrógeno amoniacal (Reactivo Nessler)**

Cuando se realiza la prueba de nitrógeno amoniacal, al poner las muestras de agua en el colorímetro, los valores de concentración que se obtienen son de nitrógeno amoniacal ( $NH_3 - N$ ) y en unidades de mg/l; sin embargo, al multiplicar esos valores por 1.22 y 1.29, se obtiene amoniaco ( $NH_3 +$ ) y amonio ( $NH_4 +$ ) respectivamente. El conocer la concentración de estos dos componentes químicos es importante, por el alto grado de toxicidad, como se mencionó en el Capítulo II.

## **IV.2.3. PRUEBAS BIOQUÍMICAS**

### **IV.2.3.1. Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Los datos que se obtienen del colorímetro una vez que los diales de reactivos han cumplido el tiempo en el digestor de DQO, son los valores que se comparan directamente con los niveles máximos permitidos en el reglamento costarricense para el DQO; sin embargo, es muy importante recordar que si se utiliza 0.2 ml de muestra y agua destilada para realizar las pruebas, es necesario multiplicar por un factor diez las lecturas que imprima el colorímetro, para obtener el valor verdadero de concentración de DQO; por otra parte, si se trabaja con 2 ml de muestra y agua destilada, los valores de DQO del colorímetro son los definitivos.

En particular, las pruebas de DQO de las tres diferentes muestras de agua se trabajaron con 0.2 ml de líquido, dado que los niveles de contaminación esperados eran muy altos.

### **IV.2.3.2. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)**

En el caso de los valores obtenidos para cada una de las muestras de aguas residuales, se tiene ciento veinte pares de tiempo y concentración de DBO; esto

dado que la prueba de laboratorio se realiza para cinco días únicamente; no obstante, para el caso específico del proyecto, se deseaba conocer la concentración de DBO en el día veinte; esto debido a que en general después del valor del quinto día de la prueba, tiende a mantenerse constante el valor de DBO, y al extrapolar se puede saber en cuánto aproximadamente puede llegar a ser la concentración; a pesar que la reglamentación costarricense toma como valor para comparar el día cinco únicamente.

Para determinar la concentración de DBO en el día veinte, fue necesario conocer la tendencia de los datos obtenidos por el equipo de DBO; es por ello que se debía saber el orden de la gráfica generada por los datos y eso se realizó como se indicó en el Capítulo II, una vez que se tuvo la certeza del orden; con la recta lineal de mejor ajuste se pudo extrapolar para el día veinte y conocer la concentración que le corresponde.

#### **IV.2.4. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS**

##### **IV.2.4.1. Recuentos de Microorganismos e Identificación de Bacterias**

En el caso de los resultados de las pruebas microbiológicas, los datos fueron dados por el Laboratorio de Microbiología Agrícola del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). El proceso de trabajo se detalló en el capítulo anterior y la identificación y el conteo de los microorganismos fueron realizados por el equipo de trabajo del laboratorio, por lo que únicamente los datos procesados fue lo entregado para el fin de este proyecto.

Por último, en el caso de que no se haya mencionado el proceso de obtención de los resultados de algunas de las pruebas físico-químicas, es debido a que por el tipo específico de prueba, los valores de los resultados finales se obtienen directamente de la lectura de los equipos, y por ese motivo se puede comparar directamente con los reglamentos y normas costarricenses.

**CAPÍTULO V**  
**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS QUE SE REALIZARON A LAS**  
**TRES MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES**

**V.1. PRUEBAS FÍSICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO**

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas físicas que se realizaron a cada una de las tres muestras se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 7: Resultados de Pruebas Físicas.

<b>Prueba</b>	<b>Laboratorio (mg/l)</b>	<b>Límite Recomendado (mg/l)</b>
<b>Sólidos Totales</b>		
Tenería	903	-
Beneficio	278	-
Condominios	41	-
<b>Sólidos Filtrables</b>		
Tenería	445	-
Beneficio	252	-
Condominios	33	-
<b>Sólidos Suspendidos o No filtrables</b>		
Tenería	458	150
Beneficio	26	500
Condominios	8	300
<b>Sólidos Volátiles</b>		
Tenería	146	-
Beneficio	30	-
Condominios	0	-
<b>Sólidos Disueltos</b>		
Tenería	2800	250
Beneficio	1111	250
Condominios	325	250
<b>Sólidos Sedimentables</b>		
Tenería	500	1
Beneficio	0.8	1
Condominios	70	1

Fuente: La autora.

A pesar de haberse tomado las muestras de los reactores biológicos de cada planta y no de los efluentes, algunos de los valores obtenidos para las diferentes pruebas no se encuentran muy lejanos de los datos reglamentarios para los efluentes, como se observa en la tercera columna del Cuadro 7; en el caso de los sólidos suspendidos para la muestra de la Tenería, es superior al límite máximo de 150 mg/l; esto pudo deberse a la cantidad de materiales (pelos y pedazos de carnes) que quedan suspendidos en el agua después de limpiarse los cueros; además, el agua de la muestra no contaba con el proceso de sedimentación en el punto donde se tomó. Ahora bien, para el caso de las muestras del Beneficio y el Condominio, se mantuvieron en 474 mg/l y 292 mg/l, por debajo del límite permitido respectivamente.

Con respecto a los resultados de los sólidos disueltos de todas las muestras de la plantas, no cumplieron con el límite máximo permitido; la muestra del Condominio incumple en 75 mg/l, por lo que se puede considerar bastante buena, dado que es el agua del reactor biológico. Por otro lado, la muestra del Beneficio incumplió por 861 mg/l, lo que demuestra que el punto donde se realizaron los muestreos aún no ha completado el proceso de eliminación los sólidos disueltos; sin embargo, se puede decir que el agua está en buenas condiciones y no contiene un exceso de materiales disueltos. Por último, la muestra de la Tenería sobrepasó el límite máximo en 2550 mg/l de sólidos disueltos; esto debido a las características de los diferentes procesos de eliminación de residuos de los cueros; muchos de los materiales disueltos en este tipo de agua residual son de origen orgánico, como la sangre, fluidos secos en los pedazos de carne eliminados de las pieles y algunas grasas; no obstante, a lo largo de la continuidad del proceso de descontaminación de cada planta de tratamiento es que se van separando los sólidos que se disuelven en el agua únicamente si existe algún tipo de químico que ayude a la eliminación de los materiales disueltos en el agua.

Es importante recordar que el límite de 250 mg/l de sólidos disueltos en aguas residuales es únicamente para poder clasificarla como aceptable para reuso,

según el Reglamento de Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Aguas Superficiales.

La prueba de sólidos sedimentables demostró la cantidad de material suspendido con el que cuentan las aguas (Cuadro 7); de igual manera que los sólidos disueltos, la muestra de la Tenería fue la que sobrepasó en mayor cantidad el valor del límite máximo por 499 mg/l, a diferencia de las aguas del Beneficio, que cumplieron con el valor máximo de 1 mg/l, a pesar de no verse traslúcidas las aguas, no contaban con materiales flotantes. Finalmente la muestra del Condominio superó el valor máximo en 75 mg/l; sin embargo, se podría decir que es aceptable dado que el punto donde se tomó la muestra aún no contaba con el proceso de sedimentación.

## **V.2. PRUEBAS QUÍMICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO**

En canto a la caracterización química realizada a los tres diferentes tipos de agua, se obtuvo de las pruebas de OD, Conductividad y Temperatura, los siguientes valores, según el Cuadro 8:

Cuadro 8: Resultados de los Parámetros Químicos: OD y Conductividad y el Parámetro Físico Temperatura.

<b>Descripción</b>	<b>Tenería</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Condominios</b>	<b>Unidades</b>
<b>pH</b>				
Temperatura	15.7	17.7	16.7	°C
Valor	10.21	8.01	9.09	
<b>Oxígeno Disuelto</b>				
Temperatura	15	16.6	16.8	°C
Valor	4.24	0.88	0.57	mg/l
<b>Conductividad</b>				
Temperatura	13.1	17.2	15.2	°C
Valor	5690	2400	682	us/cm

Fuente: La autora.

A pesar de que las muestras no contaban con el proceso completo de descontaminación, los valores que se obtuvieron de las aguas analizadas se encuentran en condiciones aceptables, como se observa en el Cuadro 9, una vez que se compararon con las regulaciones y reglamentos.

Cuadro 9: Resumen de parámetros químicos y regulación.

<b>Parámetros</b>	<b>Tenería</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Condominios</b>	<b>Regulación y Límites Recomendados</b>
<b>pH</b>	10.21	8.01	9.09	5 a 9 y 6.5 a 7.5 para crecimiento de bacterias
<b>OD</b>	4.24 mg/l	0.88 mg/l	0.57 mg/l	8 mg/l para aguas buenas
<b>CD</b>	5690 us/cm	2400 us/cm	682 us/cm	Valores altos implica alta contaminación
<b>Temperatura promedio</b>	15 °C	17°C	16°C	15°C a 25°C

Fuente: La autora.

Es importante mencionar que los valores de Oxígeno Disuelto de la Tenería, son significativamente superiores a los de las muestras del Beneficio y el Condominio; dado que la planta de la Tenería cuenta con un sistema de aireación desde el inicio del tratamiento de las aguas hasta un tanque antes del sedimentador que va al efluente; esto para evitar la concurrencia de mal olor del agua, e indirectamente incrementa la cantidad de oxígeno en el agua. Por otra parte, para el valor del Condominio, a pesar de ser una planta con aireación constante, las lecturas de OD no resultaron tan altas.

- **Potencial de Hidrógeno-pH**

Según el reglamento de reuso y vertido de agua, el pH de las aguas residuales debe mantenerse entre 5 y 9 para mantener el equilibrio entre acidez y condiciones básicas, y poder permitir el crecimiento de microorganismos. De los valores que se obtuvieron en el laboratorio, todos estuvieron por encima del nivel ideal (pH=7); en el caso del agua de Tenería y el Condominio, se superó el nivel máximo permitido de nueve unidades de pH; por otro lado, el dato de la muestra del Beneficio se mantuvo entre los límites permitidos. Referente al crecimiento bacteriano, se podría decir que con los valores de pH que se

registraron de las muestras de cada planta, el nivel de acidez es más alto que el límite máximo que se supone ideal para el crecimiento de microorganismos; por lo que algunos no lograrían sobrevivir, en ese medio, inhibiendo el proceso de descontaminación por degradación orgánica.

- **Oxígeno Disuelto**

Con respecto a las pruebas de OD, lo que se busca es conocer la cantidad de oxígeno en el agua, para que puedan sobrevivir los microorganismos y animales acuáticos; el valor óptimo para ello es de ocho como se mencionó anteriormente, por debajo de este número se consideran aguas malas e incluso muchos peces no sobrevivirían; de los valores de las muestras es evidente el poco oxígeno disuelto con el que cuentan.

En las aguas del Beneficio y el Condominio es casi cero la cantidad de OD, dado el alto grado de contaminantes; por otra parte, en el caso de la Tenería el valor fue de un poco más de la mitad del valor óptimo, lo que indica que algunos microorganismos que consumen poco oxígeno podrían sobrevivir en el agua con el grado de contaminación que tenía la muestra en el punto donde se obtuvo.

- **Conductividad**

De las pruebas de conductividad que se le hacen a las aguas, lo que se busca es conocer el grado de contaminación que contengan, dado que valores pequeños son proporcionales a poca contaminación y datos altos son indicadores de gran contaminación. De los valores del laboratorio, todos fueron superiores a las cien unidades; sin embargo, en las aguas de la Tenería y el Beneficio, fueron extremadamente altos, lo que afirma alta cantidad de contaminantes. Para la muestra del Condominio, a pesar de que el valor fue de 682 us/cm, estuvo muy por debajo de los valores de las muestras de los otros dos sitios; no obstante, el resultado de la medición de las aguas del Condominio es lo suficientemente alto para indicar contaminación.

- **Temperatura**

En el caso de la temperatura, a pesar de ser un parámetro físico, se encuentra en la sección de pruebas químicas, dado que cada vez que se toman los valores de OD, pH y Conductividad, los equipos del laboratorio muestran la temperatura a la que se encuentran las aguas; todos los valores de temperatura que se obtuvieron de cada lectura, se promediaron, como se observa en el Cuadro 9; de ese promedio se observa que las tres muestras de agua se encuentran dentro del rango permitido por el reglamento de reuso y vertido de agua.

- **Nitrógeno y Fósforo**

Los datos de las pruebas y los valores máximos permitidos por la norma costarricense se observan a continuación.

Cuadro 10: Parámetros Químicos.

Sitio	Fosfatos (mg/l)	Nitritos (mg/l)	Nitratos (mg/l)	Nitrógeno Amoniacal (mg/l)
<b>Tenería</b>	11.65	1.575	5.2	6.75
<b>Beneficio</b>	4.4	0.75	18	7.45
<b>Condominios</b>	12.7	0	13.5	5.85

Fuente: La autora.

Cuadro 11: Valores de Nitrógeno Amoniacal, Amoniacado y Amonio.

Sitio	Nitrógeno Amoniacal NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	Amoniacado (NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> ) NH <sub>3</sub> -N X 1.22 (mg/l)	Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) NH <sub>3</sub> -N X 1.29 (mg/l)
<b>Tenería</b>	6.75	8.24	8.71
<b>Beneficio</b>	7.45	9.09	9.61
<b>Condominios</b>	5.85	7.14	7.55

Fuente: La autora.

Cuadro 12: Valores de Fósforo Reactivo y Fósforo Total.

Sitio	Fosfatos (mg/l)	Fósforo Reactivo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/l)	Fósforo (mg/l)
<b>Tenería</b>	11.65	8.70	3.80
<b>Beneficio</b>	4.4	3.29	1.43
<b>Condominios</b>	12.7	9.49	4.14

Fuente: La autora.



Cuadro 13: Valores máximos de Parámetros Químicos permitidos por el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor máximo (mg/l)</b>
Fosfatos	25
Fósforo	0.005-5
Nitrógeno	50
Nitritos	500-4000
Nitratos	10
Nitrógeno Amoniacal	0.2

Fuente: Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales, compilado por la autora.

Al comparar los valores del laboratorio (Cuadros 10, 11 y 12), con los valores máximos de la regulación costarricense (Cuadro 13), se puede confirmar el alto grado de contaminación que presentan las muestras de agua; no obstante, a pesar de que las muestras se tomaron de los reactores biológicos, las tres aguas coincidieron en cumplir con la cantidad de nitritos permitidos, con todos los datos inferiores a los 2 mg/l.

De las demás cuantificaciones, todas las muestras cumplen con la cantidad máxima de Fósforo y Fosfatos; no obstante, en cuanto a los componentes de Nitratos y Nitrógeno Amoniacal, las tres muestras incumplieron con los valores máximos permisibles, con excepción de la muestra de la Tenería, que cumple con el valor de nitratos con un valor de 5.2 mg/l como se observa en el Cuadro 10.

### **V.3. PARÁMETROS DE LAS MUESTRAS DE LOS REACTORES ANAEROBIOS Y AEROBIOS**

Además de los parámetros de OD, CD, temperatura y pH, que se evaluaron a las muestras de las aguas residuales que venían directamente de las plantas de tratamiento, se dispuso muestras de aguas en reactores tanto aerobio como anaerobio, y durante el proceso de estabilización y funcionamiento de estos, se tomaron datos de parámetros físico-químicos, para cuantificar si los procesos de descontaminación se estaba llevando a cabo, como se observa en el Cuadro 10.

Si se observa en el Cuadro 14, los valores de pH, en todas las lecturas, se mantienen dentro del rango de 7-9 unidades de pH, indicando un buen equilibrio entre niveles ácidos y básicos de las aguas; sin embargo, solamente el pH del reactor aerobio de la Tenería se mantuvo dentro de los límites óptimos para que se dé el crecimiento adecuado de microorganismos.

En el caso de los resultados de OD, se pudo determinar que las cantidades de oxígeno son lo suficientemente buenas para que pueda existir algún tipo de vida, a pesar de ser valores inferiores a 8 mg/l, considerado como el nivel óptimo de OD para que exista vida sin ningún problema.

En el caso de la Tenería, el OD se mantuvo similar a las lecturas de la planta, a diferencia de las muestras del Beneficio y el Condominio, en los que los niveles de OD de los reactores anaerobios fueron inferiores a las lecturas de las muestras de las plantas; sin embargo, para el caso de los reactores aerobios que contaban con aireación constante, mejoró la eficiencia en cuanto al proceso de descontaminación; esto fue evidente debido a que los valores de OD fueron mucha más cercanos al valor óptimo.

A pesar de que las aguas de los reactores mejoraron la cantidad de OD y los niveles de pH, el grado de contaminación fue evidente con los valores de

conductividad; en su mayoría fueron superiores a los 500 us/cm, los 1000 us/cm y en una ocasión hasta los 5000 us/cm; de igual forma los sólidos totales disueltos fueron superiores al valor de 250 mg/l, para poderla clasificar como un agua aceptable para reutilizar; no obstante, todos los valores de conductividad y sólidos totales disueltos de los reactores, fueron inferiores a las lecturas tomadas de las muestras de las plantas de tratamiento, lo que indica que mejoró la calidad del agua en los procesos anaerobios y aerobios de los reactores.

Por último, el parámetro de temperatura se mantuvo dentro del rango establecido por la norma costarricense (mencionado en el Cuadro 9), en cada una de las mediciones que se les hicieron a las diferentes muestras de los reactores.

Cuadro 14: Resultados de los Parámetros Químicos: OD y Conductividad y los Parámetros Físicos de Temperatura y Sólidos Totales Disueltos de los reactores anaerobio y aerobio.

Sitio	Tenería		Beneficio				Condominios				Unidades
	Reactor Anaerobio 6 días	Reactor Aerobio 2 días	Reactor Aerobio 2 días	Reactor Anaerobio 50 días	Reactor Aerobio 2 días	Reactor Aerobio 2 días	Reactor Anaerobio 7 días	Reactor Aerobio 9 días	Reactor Aerobio 9 días	Reactor Aerobio 7 días	
<b>pH</b>		Sin Filtrar	Filtrada		Sin Filtrar	Filtrada		Filtrada	Sin Filtrar	Sin Filtrar	
Temperatura	20.6	20.9	20.9	20.8	19.7	19.6	20.5	19.4	19.5	20.3	°C
Medición	8.06	7.47	7.86	8.2	7.89	7.64	8.26	8.27	7.88	7.82	
<b>Oxígeno Disuelto</b>											
Temperatura	21	21.3	21.1	20.7	19.2	19.4	21	19.2	19.5	20.4	°C
Medición	3.32	3.12	4.76	0.67	5.93	5.68	0.305	6.11	6.55	5.11	mg/l
<b>Conductividad</b>											
Temperatura	20.5	20.8	20.8	21.4	19.8	19.9	20.7	19.3	19.6	20.2	°C
Medición	5510	547	613	1936	1296	1364	690	675	679	648	us/cm
<b>Sólidos Totales Disueltos</b>											
Temperatura	19.7	20.3	19.9	20.3	19.1	18.9	20.6	18.5	18.7	19.2	
Medición	2630	243	304	925	343	365	305	314	280	311	mg/l

Fuente: La autora.

#### **V.4. PRUEBAS BIOQUÍMICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO**

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Los datos de las pruebas de DQO que se obtuvieron en el laboratorio se observan en el siguiente cuadro:

Cuadro 15: Parámetros de DQO de las tres muestras de aguas residuales.

<b>DQO</b>	<b>Datos de Laboratorio (mg/l)</b>
<b>Tenería</b>	270
<b>Beneficio</b>	1860
<b>Condominios</b>	100

Fuente: La autora.

Al comparar los datos obtenidos en el laboratorio con el Reglamento de Vertido y Reuso del Aguas Residuales, se establece como límite máximo de 750 mg/l de DQO en las aguas residuales que son vertidas en alcantarillados sanitarios y de 150 mg/l en aguas vertidas a cuerpos receptores; sin embargo, para aguas residuales provenientes de los Beneficios de café, el DQO máximo permitido es de 1400 mg/l y para las aguas residuales generadas por el tratamiento de cueros, el límite máximo permitido es de 400 mg/l.

Al comparar las lecturas del DQO con la norma, el agua de los Condominios cumple con los dos límites máximos establecidos para aguas residuales comunes; en el caso de la muestra de la Tenería también cumple con el límite máximo para el tipo de agua residual que genera el tratamiento de cueros y, por último, la muestra de agua proveniente del Beneficio no cumple por completo ninguno de los valores permitidos, en especial excede el límite máximo para el tipo de agua que produce en 460 mg/l.

Para esta prueba, hay que recordar que todas las muestras de aguas fueron tomadas aun sin haberse terminado el proceso de descontaminación; por lo que, a pesar de que algunos valores no están por debajo de la norma, se encuentran en muy buenas condiciones de limpieza.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

En el caso de los resultados de las pruebas de DBO, los valores a los cinco días y la extrapolación a los veinte días, que se muestran en el Cuadro 16, se utilizaron todos los valores que se obtuvieron del equipo para DBO del laboratorio, de los que se tomaron los valores representativos para graficarlos (Cuadro 17) y, de esa manera, observar la tendencia y el tiempo que tardaron las muestras de aguas en estabilizarse, como se observa en los gráficos de las Figura 28, 29 y 30.

Cuadro 16: Parámetros de DBO de las tres muestras de aguas residuales y regulación.

<b>Valores de DBO</b>			
<b>Sitio</b>	<b>Beneficio</b>	<b>Condominios</b>	<b>Tenería</b>
<b>DBO a los 5 días</b>	695	180	452
<b>Reglamento (mg/l)</b>	700	50	150
<b>DBO a los 20 días</b>	2599.9	820.6	1781.3

Fuente: La autora.

Cuadro 17: Valores de parámetros de DBO para realizar las gráficas de las tres muestras de aguas residuales.

<b>Hora</b>	<b>Beneficio</b>			<b>Condominios</b>			<b>Tenería</b>		
	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>LN(DBO)</b>	<b>1/(DBO)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>LN(DBO)</b>	<b>1/(DBO)</b>	<b>DBO (mg/l)</b>	<b>LN(DBO)</b>	<b>1/(DBO)</b>
1	2.8	1.030	0.3571	2.1	0.74	0.4762	28.2	3.34	0.0355
2	2.8	1.030	0.3571	3.6	1.28	0.2778	28.2	3.34	0.0355
3	17.3	2.851	0.0578	5.7	1.74	0.1754	14.1	2.65	0.0709
4	16.9	2.827	0.0592	6.8	1.92	0.1471	56.5	4.03	0.0177
5	23.1	3.140	0.0433	13	2.56	0.0769	70.6	4.26	0.0142
6	25.3	3.231	0.0395	15.7	2.75	0.0637	70.6	4.26	0.0142
7	25.3	3.231	0.0395	20.1	3.00	0.0498	42.4	3.75	0.0236
8	31.7	3.456	0.0315	28.2	3.34	0.0355	42.4	3.75	0.0236
9	33.8	3.520	0.0296	28.2	3.34	0.0355	56.5	4.03	0.0177
10	34.1	3.529	0.0293	32	3.47	0.0313	84.7	4.44	0.0118

Continuación Cuadro 17

Hora	Beneficio			Condominios			Tenería		
	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)
11	41.1	3.716	0.0243	36.1	3.59	0.0277	113	4.73	0.0088
12	38.3	3.645	0.0261	40.1	3.69	0.0249	113	4.73	0.0088
13	52.4	3.959	0.0191	40.2	3.69	0.0249	98.9	4.59	0.0101
14	63.6	4.153	0.0157	44.1	3.79	0.0227	70.6	4.26	0.0142
15	71.1	4.264	0.0141	44.1	3.79	0.0227	70.6	4.26	0.0142
16	89.1	4.490	0.0112	50.2	3.92	0.0199	84.7	4.44	0.0118
17	89.1	4.490	0.0112	52.1	3.95	0.0192	113	4.73	0.0088
18	100	4.605	0.0100	54.3	3.99	0.0184	141	4.95	0.0071
19	103	4.635	0.0097	54.3	3.99	0.0184	155	5.04	0.0065
20	115	4.745	0.0087	56.7	4.04	0.0176	141	4.95	0.0071
21	104	4.644	0.0096	56.5	4.03	0.0177	113	4.73	0.0088
22	119	4.779	0.0084	56.7	4.04	0.0176	113	4.73	0.0088
23	130	4.868	0.0077	60.4	4.10	0.0166	127	4.84	0.0079
24	135	4.905	0.0074	62.4	4.13	0.0160	184	5.21	0.0054
25	153	5.030	0.0065	62.4	4.13	0.0160	155	5.04	0.0065
26	152	5.024	0.0066	66.3	4.19	0.0151	127	4.84	0.0079
27	160	5.075	0.0063	69.1	4.24	0.0145	184	5.21	0.0054
28	166	5.112	0.0060	69.1	4.24	0.0145	155	5.04	0.0065
29	183	5.209	0.0055	70.6	4.26	0.0142	141	4.95	0.0071
30	189	5.242	0.0053	70.9	4.26	0.0141	184	5.21	0.0054
31	189	5.242	0.0053	72.3	4.28	0.0138	184	5.21	0.0054
32	201	5.303	0.0050	72.3	4.28	0.0138	184	5.21	0.0054
33	203	5.313	0.0049	74.7	4.31	0.0134	155	5.04	0.0065
34	214	5.366	0.0047	74.9	4.32	0.0134	169	5.13	0.0059
35	233	5.451	0.0043	76.1	4.33	0.0131	226	5.42	0.0044
36	231	5.442	0.0043	74.9	4.32	0.0134	198	5.29	0.0051
37	253	5.533	0.0040	79.2	4.37	0.0126	184	5.21	0.0054
38	269	5.595	0.0037	76.1	4.33	0.0131	184	5.21	0.0054
39	267	5.587	0.0037	82.1	4.41	0.0122	198	5.29	0.0051
40	270	5.598	0.0037	84.2	4.43	0.0119	240	5.48	0.0042
41	273	5.609	0.0037	86.1	4.46	0.0116	240	5.48	0.0042
42	280	5.635	0.0036	86.2	4.46	0.0116	212	5.36	0.0047
43	283	5.645	0.0035	88.7	4.49	0.0113	198	5.29	0.0051
44	293	5.680	0.0034	90.1	4.50	0.0111	212	5.36	0.0047
45	304	5.717	0.0033	93.7	4.54	0.0107	254	5.54	0.0039
46	307	5.727	0.0033	94.6	4.55	0.0106	254	5.54	0.0039
47	308	5.730	0.0032	95.8	4.56	0.0104	212	5.36	0.0047
48	322	5.775	0.0031	98.7	4.59	0.0101	212	5.36	0.0047
49	324	5.781	0.0031	98.9	4.59	0.0101	240	5.48	0.0042
50	329	5.796	0.0030	101.3	4.62	0.0099	268	5.59	0.0037
51	329	5.796	0.0030	104.7	4.65	0.0096	226	5.42	0.0044
52	352	5.864	0.0028	106.8	4.67	0.0094	240	5.48	0.0042
53	357	5.878	0.0028	113.1	4.73	0.0088	297	5.69	0.0034
54	357	5.878	0.0028	117.2	4.76	0.0085	268	5.59	0.0037
55	359	5.883	0.0028	120.9	4.79	0.0083	254	5.54	0.0039
56	359	5.883	0.0028	123.7	4.82	0.0081	240	5.48	0.0042
57	361	5.889	0.0028	125.9	4.84	0.0079	254	5.54	0.0039
58	361	5.889	0.0028	120.9	4.79	0.0083	311	5.74	0.0032

Continuación Cuadro 17

Hora	Beneficio			Condominios			Tenería		
	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)
59	375	5.927	0.0027	123.6	4.82	0.0081	297	5.69	0.0034
60	382	5.945	0.0026	126.7	4.84	0.0079	268	5.59	0.0037
61	394	5.976	0.0025	129.3	4.86	0.0077	254	5.54	0.0039
62	402	5.996	0.0025	131.4	4.88	0.0076	268	5.59	0.0037
63	413	6.023	0.0024	125.1	4.83	0.0080	311	5.74	0.0032
64	425	6.052	0.0024	126.7	4.84	0.0079	325	5.78	0.0031
65	432	6.068	0.0023	129.3	4.86	0.0077	311	5.74	0.0032
66	439	6.084	0.0023	131.2	4.88	0.0076	297	5.69	0.0034
67	446	6.100	0.0022	133.4	4.89	0.0075	297	5.69	0.0034
68	452	6.114	0.0022	135.7	4.91	0.0074	282	5.64	0.0035
69	452	6.114	0.0022	137.5	4.92	0.0073	339	5.83	0.0029
70	452	6.114	0.0022	139.7	4.94	0.0072	297	5.69	0.0034
71	457	6.125	0.0022	142.3	4.96	0.0070	282	5.64	0.0035
72	459	6.129	0.0022	137.4	4.92	0.0073	311	5.74	0.0032
73	463	6.138	0.0022	137.5	4.92	0.0073	325	5.78	0.0031
74	465	6.142	0.0022	142.4	4.96	0.0070	297	5.69	0.0034
75	469	6.151	0.0021	144.2	4.97	0.0069	311	5.74	0.0032
76	472	6.157	0.0021	144.5	4.97	0.0069	353	5.87	0.0028
77	472	6.157	0.0021	146.7	4.99	0.0068	325	5.78	0.0031
78	481	6.176	0.0021	148.9	5.00	0.0067	297	5.69	0.0034
79	457	6.125	0.0022	149.3	5.01	0.0067	325	5.78	0.0031
80	463	6.138	0.0022	146.7	4.99	0.0068	339	5.83	0.0029
81	463	6.138	0.0022	148.9	5.00	0.0067	311	5.74	0.0032
82	465	6.142	0.0022	150.1	5.01	0.0067	311	5.74	0.0032
83	465	6.142	0.0022	153.2	5.03	0.0065	367	5.91	0.0027
84	472	6.157	0.0021	128.2	4.85	0.0078	381	5.94	0.0026
85	475	6.163	0.0021	156.7	5.05	0.0064	339	5.83	0.0029
86	481	6.176	0.0021	154.7	5.04	0.0065	325	5.78	0.0031
87	480	6.174	0.0021	157	5.06	0.0064	381	5.94	0.0026
88	494	6.203	0.0020	157.9	5.06	0.0063	381	5.94	0.0026
89	499	6.213	0.0020	159.1	5.07	0.0063	325	5.78	0.0031
90	457	6.125	0.0022	160.2	5.08	0.0062	381	5.94	0.0026
91	459	6.129	0.0022	163.7	5.10	0.0061	410	6.02	0.0024
92	459	6.129	0.0022	167.1	5.12	0.0060	381	5.94	0.0026
93	461	6.133	0.0022	171	5.14	0.0058	353	5.87	0.0028
94	470	6.153	0.0021	179	5.19	0.0056	367	5.91	0.0027
95	472	6.157	0.0021	171	5.14	0.0058	424	6.05	0.0024
96	475	6.163	0.0021	164.7	5.10	0.0061	410	6.02	0.0024
97	482	6.178	0.0021	165.2	5.11	0.0061	367	5.91	0.0027
98	495	6.205	0.0020	166.3	5.11	0.0060	395	5.98	0.0025
99	500	6.215	0.0020	170.2	5.14	0.0059	438	6.08	0.0023
100	502	6.219	0.0020	173	5.15	0.0058	410	6.02	0.0024
101	502	6.219	0.0020	171	5.14	0.0058	395	5.98	0.0025
102	502	6.219	0.0020	173	5.15	0.0058	395	5.98	0.0025
103	530	6.273	0.0019	171	5.14	0.0058	395	5.98	0.0025
104	530	6.273	0.0019	170.4	5.14	0.0059	452	6.11	0.0022
105	525	6.263	0.0019	169	5.13	0.0059	466	6.14	0.0021
106	635	6.454	0.0016	169	5.13	0.0059	480	6.17	0.0021

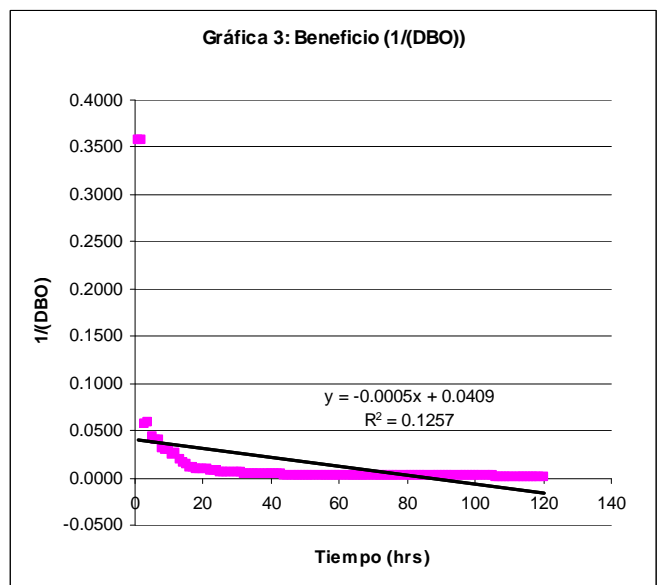
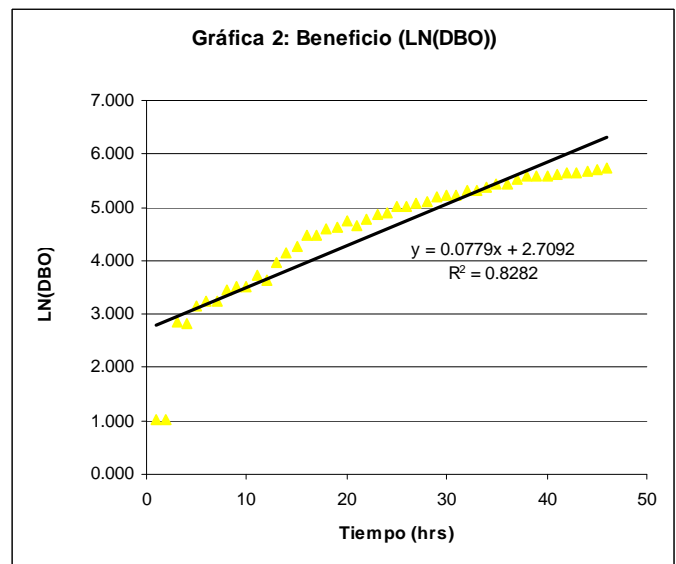
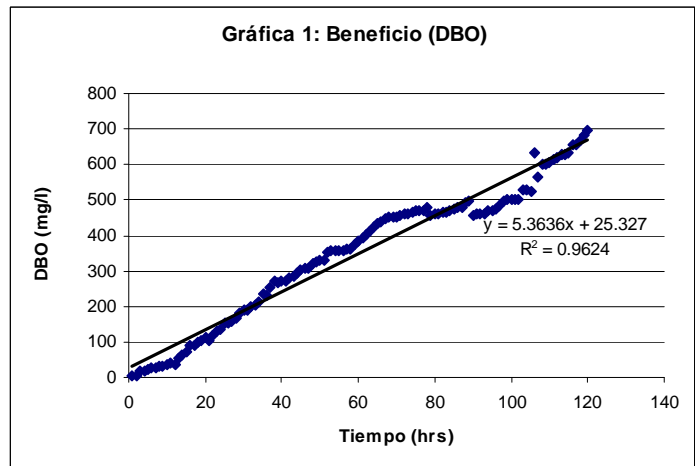


Continuación Cuadro 17

Hora	Beneficio			Condominios			Tenería		
	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)	DBO (mg/l)	LN(DBO)	1/(DBO)
107	563	6.333	0.0018	169	5.13	0.0059	438	6.08	0.0023
108	600	6.397	0.0017	172	5.15	0.0058	424	6.05	0.0024
109	601	6.399	0.0017	172	5.15	0.0058	424	6.05	0.0024
110	604	6.404	0.0017	171	5.14	0.0058	438	6.08	0.0023
111	614	6.420	0.0016	174.3	5.16	0.0057	480	6.17	0.0021
112	620	6.430	0.0016	175.6	5.17	0.0057	494	6.20	0.0020
113	630	6.446	0.0016	176.3	5.17	0.0057	480	6.17	0.0021
114	630	6.446	0.0016	177.4	5.18	0.0056	438	6.08	0.0023
115	635	6.454	0.0016	178.4	5.18	0.0056	438	6.08	0.0023
116	654	6.483	0.0015	179	5.19	0.0056	438	6.08	0.0023
117	654	6.483	0.0015	180	5.19	0.0056	452	6.11	0.0022
118	669	6.506	0.0015	179.4	5.19	0.0056	494	6.20	0.0020
119	683	6.526	0.0015	181	5.20	0.0055	452	6.11	0.0022
120	695	6.544	0.0014	180	5.19	0.0056	452	6.11	0.0022

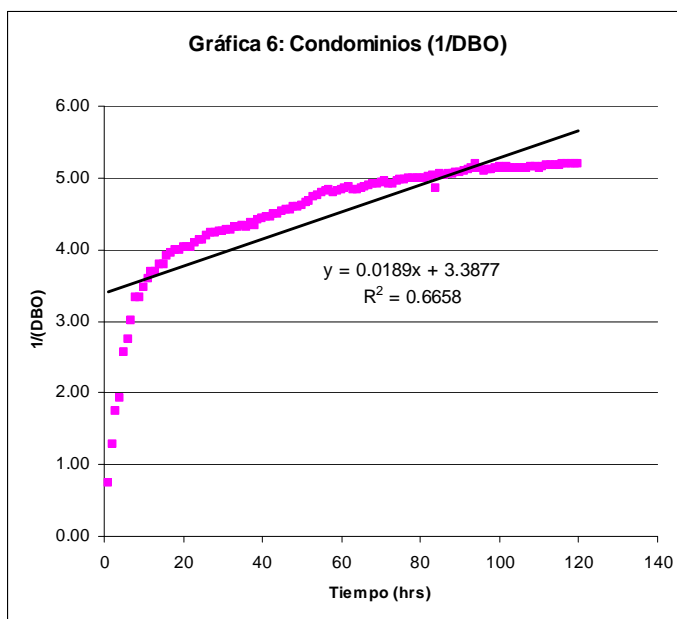
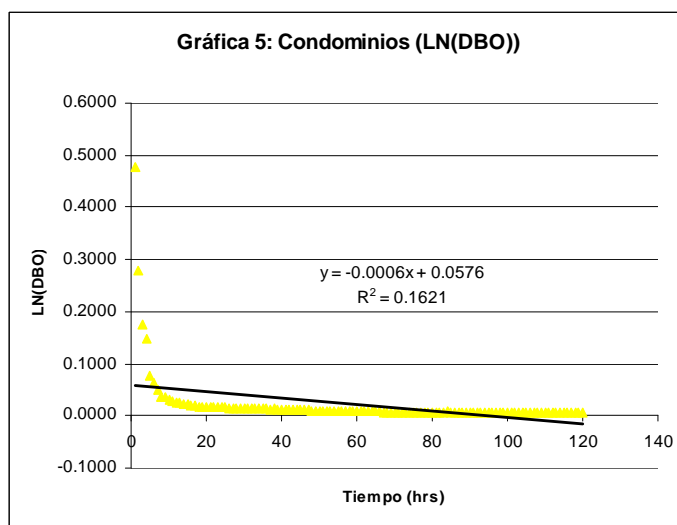
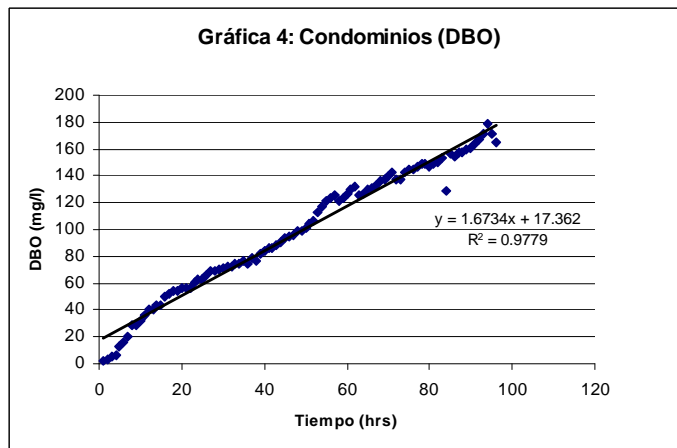
Fuente: La autora.

Figura 28: Gráficos de los valores de DBO para el Beneficio.



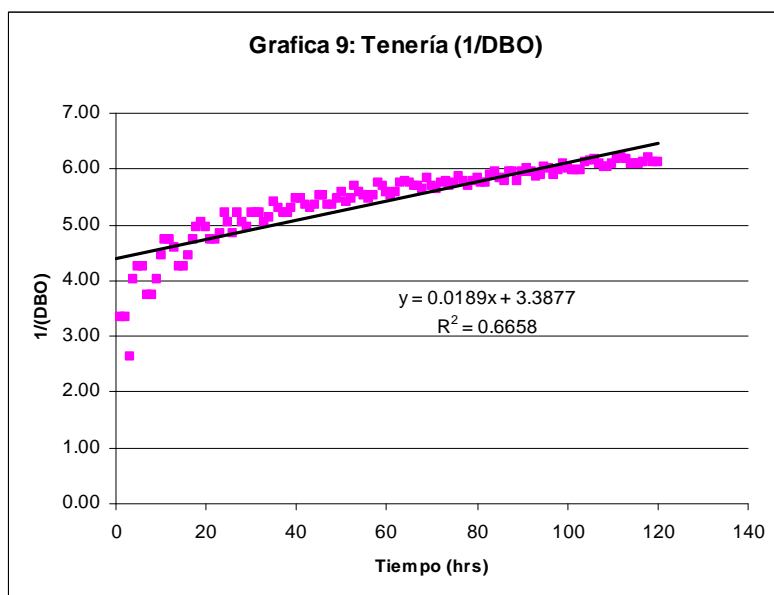
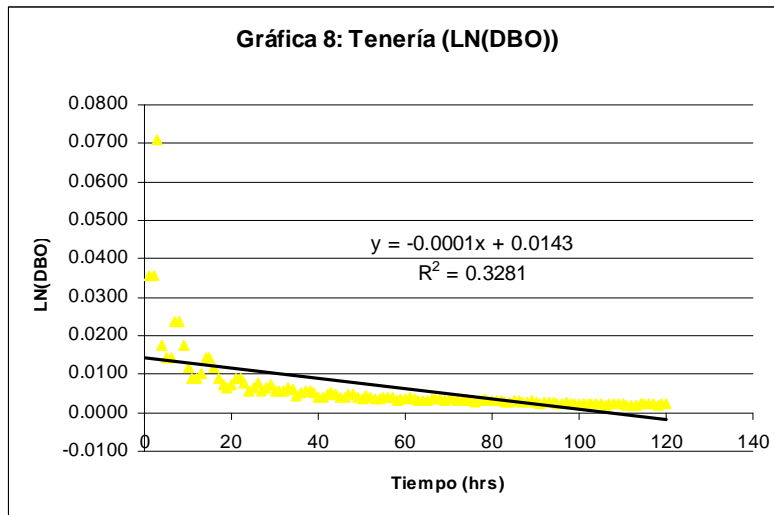
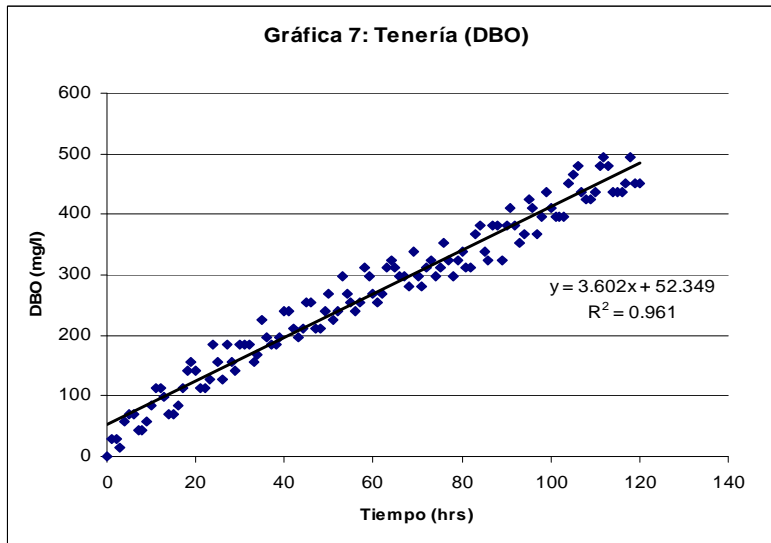
Fuente: La autora.

Figura 29: Gráficos de los valores de DBO para el Condominio.



Fuente: La autora.

Figura 30: Gráficos de los valores de DBO para el Tenería.



Fuente: La autora.

Una vez que se graficaron los datos del Cuadro 17 de las pruebas de DBO, se logró determinar el orden de cada una de las gráficas que para los tres casos fue de cero, dado que la regresión lineal en cada uno fue más próximo a uno.

Con las ecuaciones de las rectas de mejor ajuste de los Gráficos 1, 4 y 7 se extrapoló el valor de concentración de DBO a los veinte días, para el Beneficio, el Condominio y la Tenería respectivamente, como se observa en el Cuadro 16; de ese mismo cuadro se pueden comparar los valores de  $DBO_5$  y  $DBO_{20}$  con el límite máximo de DBO permitido por el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales para las aguas que son depositadas en un cuerpo de agua, y se determinó que para los tres tipos de aguas es evidente el grado de contaminación, debido a los elevados valores de DBO; sin embargo, hay que recordar que el punto de obtención de las muestras fue en cada uno de los reactores biológicos, donde todavía no se ha terminado el proceso de descontaminación.

## **V.5. PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA DE CADA PLANTA DE TRATAMIENTO Y DE LOS REACTORES ANAERODIOS Y AEROBIOS**

### **V.4.1. MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS**

Para la contabilización e identificación de los microorganismos, en total se realizaron ocho pruebas; se identificó la cantidad de microorganismos aerobios y anaerobios, así como el microorganismo predominante, en cada muestra de agua; de todos los resultados se logró determinar quince especies diferentes de bacterias, como se resumió en el Cuadro 18; en ese mismo cuadro se puede apreciar que en los tres sitios de muestreo coincidió la *pseudomonas taetrolens*.

Cuadro 18: Microorganismos identificados de las pruebas microbiológicas.

Sitio	Bacteria	Muestra
Beneficio	Pseudomonas sp	Reactor aerobio
	Comamonas Testosteroni	
	Pseudomonas fluorescens	Reactor anaerobio
	Pseudomonas taetrolens	Planta
	Leuconostoc mesenteroides	
Tenería	Pseudomonas aeruginosa	Reactor anaerobio
	Pseudomonas taetrolens	Planta
	Citrobacter sp.	Reactor anaerobio
	Pseudomonas marginalis	Reactor aerobio
Condominios	Vibrio tubiashii	Planta
	Pseudomonas taetrolens	
	Pandoraea norimbergensis Vibrio cincinnatiensis Pseudomonas maculicola	Reactor aerobio
	Ochrobactrum anthropi	Reactor aerobio Reactor anaerobio
	Klebsiella oxytoca	Reactor anaerobio
	Brevundimonas diminuta	Reactor anaerobio

Fuente: Resultados de las pruebas del Laboratorio, modificado por la autora.

- **Resultados de las Aguas del Beneficio**

En cuanto a los resultados de las pruebas del beneficio, se pudo identificar cinco microorganismos, como se observa en el Cuadro 19; de ellos, los más numerosos fueron las bacterias aerobias, del agua que provenía directamente de la planta; lo que demuestra la eficiencia del reactor biológico al mantener una población tan grande de microorganismos aerobios en los tanques anaerobios. Por otra parte, la población microbiana anaerobia aumentó considerablemente durante el proceso de descontaminación del reactor anaerobio.

Cuadro 19: Resultados microbiológicos del Beneficio.

Beneficio				
Fecha	Prueba	Muestra	Bacteria	Cantidad
17/04/2009	Reactor aerobio	Filtrada	Pseudomonas sp	
		Sin Filtrar	Comamonas Testosteroni	
15/05/2009	Reactor anaerobio	50 días	Pseudomonas fluorescens	95000000
06/03/2009	Sitio	Aerobia	<b>Pseudomonas taetrolens</b>	110000000
		Anaerobia	Leuconostoc mesenteroides	24000000

Fuente: Resultados de las pruebas del Laboratorio, modificado por la autora.

- **Resultado de las Aguas de la Tenerife**

En el caso de las muestras de aguas de la Tenerife, se obtuvo un total de cuatro microorganismos diferentes; no obstante, tres de ellos pertenecientes a la misma familia de *pseudomonas*. En el Cuadro 20 se observa en detalle, cada uno de ellos:

Cuadro 20: Resultados microbiológicos de la Tenerife.

Tenería				
Fecha	Prueba	Muestra	Bacteria	Cantidad
06/03/2009	Reactor anaerobio 16 días	Anaerobia	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	17000
		Aerobia	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	7000000
06/03/2009	Sitio	Aerobia	<b><i>Pseudomonas taetrolens</i></b>	6800000
		Anaerobia	<b><i>Pseudomonas taetrolens</i></b>	870000
03/04/2009	Reactor anaerobio	40 días	<i>Citrobacter sp.</i>	930000
31/3/2009	Reactor aerobio	Filtrada	No identificada	610000
		Sin Filtrar	<i>Pseudomonas marginalis</i>	12000000

Fuente: Resultados de las pruebas del Laboratorio, modificado por la autora.

Analizando los datos del Cuadro 20, la mayor cantidad de microorganismos presentes fueron los aerobios; lo que coincide con el sistema de aireación extendida que desarrolla la planta; sin embargo, la cantidad de bacterias aerobias que se contabilizaron del agua sin filtrar del reactor aerobio fue de casi el doble de las que se encontraban en el agua que venía directamente del sitio, indicando que el proceso de descontaminación de la planta de tratamiento tiene una mayor eficiencia; no obstante, el agua filtrada o limpia que salió del proceso del reactor, contenía una menor cantidad de microorganismos, mostrando una mejora en la descontaminación del agua; si fuera que se hubiese vertido a un cuerpo de agua o alcantarillado sanitario, lamentablemente este dato no se puede comparar con la muestra del sitio, dado que de donde se tomó el agua no contaba con los procesos suficientes de limpieza; en otras palabras, no era el agua que la planta actualmente está vertiendo, una vez culminado el tratamiento de la planta.

- **Resultados de las Aguas del Condominio**

Las pruebas microbiológicas de las muestras de las aguas del Condominio dieron como resultado un total de ocho microorganismos diferentes, siendo la planta con mayor diversidad de microorganismos, como se observa en el Cuadro 21.

Cuadro 21: Resultados microbiológicos del Condominio.

Condominio				
Fecha	Prueba	Muestra	Bacteria	Cantidad
06/03/2009	Sitio	Aerobia	Vibrio tubiashii	1200000000
		Anaerobia	<b>Pseudomonas taetrolens</b>	1400000
06/06/2009	Reactor aerobio	Sin Filtrar	Pandoraea norimbergensis Vibrio cincinnatiensis	25000000
		Filtrada	Ochrobactrum anthropi Pseudomonas maculicola	490000
	Reactor anaerobio	7 días	Klebsiella oxytoca Ochrobactrum anthropi	84000
31/03/2009	Reactor anaerobio	35 días	Brevundimonas diminuta	17000

Fuente: Resultados de las pruebas del Laboratorio, modificado por la autora.

De los microorganismos contabilizados, los que estuvieron en mayor cantidad fueron los aerobios del agua que fue estudiada directamente de la planta; si se comparan con las bacterias del reactor aerobio, la diferencia es sorprendente, como se observa en el cuadro anterior, aun con la muestra sucia del reactor.

La diferencia en la presencia de microorganismos entre las muestras de las aguas del sitio y los reactores del laboratorio, puede indicar que la eficiencia de la planta es inferior a la del reactor; sin embargo, esta comparación no es del todo cierta, dado que no se realizó ningún muestreo en el efluente de la planta para determinar la cantidad de microorganismos presentes, a la hora de que es vertida el agua tratada y, de esta manera, comprobar la verdadera eficiencia de la planta.



#### V.4.2. CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS DE LOS MICROORGANISMOS IDENTIFICADOS EN LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS

En específico, el fin del proyecto era encontrar coincidencias en más de un microorganismo en diferentes tipos de aguas residuales, con el propósito de tratar de estandarizar recomendaciones en cuanto al funcionamiento, mantenimiento y los sistemas de descontaminación de las plantas de tratamiento en general; sin embargo, como se mencionó anteriormente y se observa en el Cuadro 18, el único microorganismo coincidente en los tres tipos de aguas es la *pseudomona taetrolens* que se ilustra en la Figura 31 y estuvo presente tanto en ambiente aerobio como anaerobio.

Figura 31: Población de *pseudomona taetrolens*.



Fuente: La autora.

Las *pseudomonas taetrolens*, miembros de la familia de las pseudomonas, se caracterizan por tener: formas alargadas, de longitud cortas a medias, gram-negativas, móviles por medio de un flagelo polares (un solo flagelo o un penacho o grupo de flagelos como se observa en la Figura 32); no esporulados, aerobios y heterótrofos. Muchas veces esta *pseudomona* es conocida como la bacteria de barra que causa el moho en los huevos.

En particular, para la muestra del Beneficio, este microorganismo se encontró en medio aerobio; en el caso de las aguas del Condominio, esta bacteria estuvo presente en medio anaerobio únicamente; sin embargo, para las muestras de la

Tenería, esta *pseudomona* estuvo tanto en condición anaerobia como aerobia. Por último, de todas las aguas que se analizaron, la coincidencia de la bacteria se dio únicamente en las muestras de aguas residuales que venían directamente de los reactores biológicos de las plantas de tratamiento.

A continuación se exponen algunas de las principales características de cada una de las bacterias encontradas en las muestras de agua (Cuadro 18); para ello se utilizaron las siguientes fuentes de información: *Manual of Clinical Microbiology* como libro de texto, y páginas web como: [aguamarket.com](http://aguamarket.com), <http://ayma/atlas.htm>, [es.wikipedia.org](http://es.wikipedia.org); así como las además páginas que se compilaron en las referencias al final de la investigación.

- ***Pseudomonas***

El término *Pseudomonada* literalmente significa «falsa unidad», derivado del griego *pseudo* ('falso') y *monas* ('una sola unidad'). El término «monada» se usaba en la microbiología antigua para nombrar a los organismos unicelulares.

Este tipo de microorganismo es un género de bacilos rectos o ligeramente curvados; son del tipo gram-negativos y logran ser oxidasas positivos; por lo general son aeróbicos estrictos, aunque en algunos casos pueden utilizar el nitrato como aceptor de electrones.

Los miembros de este género, por lo general, son móviles debido a que poseen uno o más flagelos polares, como se observa en la Figura 32. Estos microorganismos presentan una gran diversidad metabólica y son capaces de colonizar un amplio rango de nichos.

Figura 32: Pseudomona del tipo marginalis.



Fuente: Wikipedia.com, 20 de agosto, 2009.

Las *Pseudomonas* pueden crecer en un medio mineral con iones de amonio o nitrato y un solo compuesto orgánico que funciona como única fuente de carbono y energía. La ganancia energética es obtenida por respiración aeróbica, no por fermentación y su crecimiento es rápido. Estos microorganismos tienen la capacidad de degradar sustancias tóxicas para el medio ambiente, a pesar de encontrarse en condiciones sumamente desfavorables.

- ***Comamonas Testosteroni***

Es una especie de bacilo gram-negativo, que generalmente se multiplica en medio aerobio; también se le conoce como pseudomonas testosteroni. Es diferente de las otras especies de *comamonas* por su capacidad testosterona y utiliza al fenelacetato o al maleato como fuentes de carbono.

La *comamona testosteroni* que se identificó en la muestra del Beneficio se obtuvo del agua que se trató en el reactor aerobio en el laboratorio; por lo que coincide con las características antes mencionadas. En la Figura 33 se ilustra la forma como se observa en los platos de cultivo del laboratorio.

Figura 33: *Pseudomona* del tipo *marginalis*.



Fuente: La autora.

- ***Pseudomona fluorescens***

Es un bacilo gram-negativo; la forma que suele tener es recta o ligeramente curvado pero no vibrioide; es saprófito (todo lo que ingiere pasa a través de la pared de su citoplasma). Este tipo de pseudomonas se puede encontrar en suelo y agua; cuando es cultivada en el laboratorio se puede observar en cantidades pequeñas como lo ilustra la siguiente figura:

Figura 34: *Pseudomona fluorescens*.



Fuente: La autora.

Este tipo de microorganismo es incapaz de formar esporas y crece generalmente en medios aeróbicos. La temperatura óptima para su funcionamiento es de 25 a 30 °C, aunque puede crecer desde los 5 hasta los 42°C aproximadamente.

La *pseudomonas fluorescens* no crece bajo condiciones ácidas ( $\text{pH} \leq 4.5$ ) y necesita preferentemente pH neutro. Al ser parte de la familia de las *pseudomonas*, tiene flagelos polares (más de uno), lo que le permite un movimiento activo en medios líquidos. Su nombre es alusivo a la reacción que presentan sus pigmentos fluorescentes (fluoresceína) a la luz; sin embargo, es posible que en condiciones de laboratorio recién cultivada o después de varios cultivos, puede ser que no reaccione.

Estos microorganismos tienen la capacidad de ser solubles en fósforo, ayudando a que se dé la producción de ácidos orgánicos, que mejoran el pH de los suelos, favoreciendo la solubilización del fósforo inorgánico y la liberación de fosfatos, que son absorbidos por las raíces de las plantas.

Otro aspecto destacable es la posibilidad de que las *Pseudomonas fluorescens* posean la virtud de producir sustancias estimuladoras del crecimiento, ya que las *Pseudomonas* en general pertenecen a un grupo llamado "estimuladores del crecimiento vegetal".

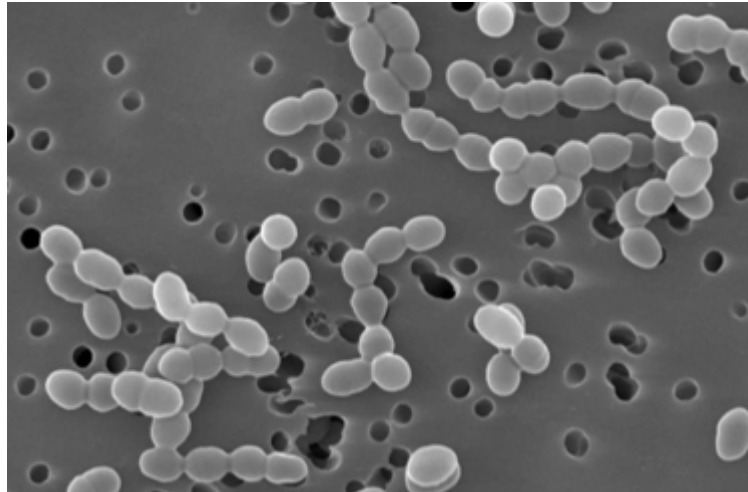
- ***Leuconostoc mesenteroides***

Este tipo de microorganismos es normalmente asociado con la fermentación, bajo condiciones de salinidad y relativa baja temperatura. Son especies epífitas de amplia propagación en medio natural y desempeñan un papel importante en varios alimentos y fermentaciones industriales. En general, presenta un crecimiento anaerobio facultativo; es un complejo que requiere factores de crecimiento y aminoácidos.

En la mayoría de los líquidos, aparecen como los cocos, que se pueden reproducir solos o en pareja y hasta en cadenas cortas, pero el crecimiento puede variar con las condiciones de cultivo de las células; pueden llegar a tener forma alargada.

De los resultados de las pruebas microbiológicas, se identificó este tipo de microorganismos en las muestras del Beneficio que se tomaron directamente del sitio y efectivamente presentaron un crecimiento anaerobio, como era de esperar. Al observar las bacterias de *Leuconostoc mesenteroides*, bajo la lente del microscopio, se ven como se ilustra en la Figura 35:

Figura 35: *Leuconostoc mesenteroides*.

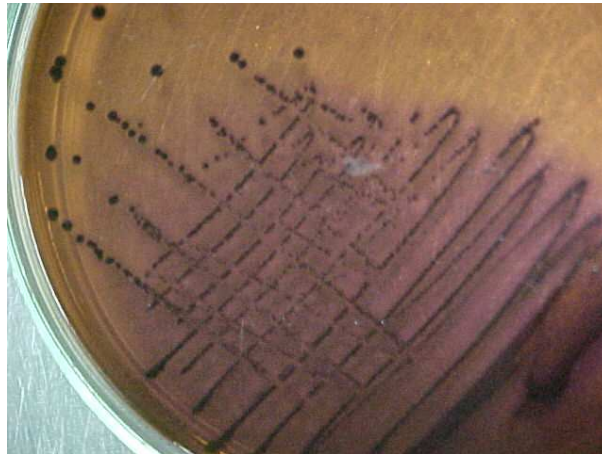


Fuente: genome.jgi-psf.org, 20 de agosto, 2009.

- ***Pseudomonas aeruginosa***

Este tipo de *pseudomonas* es una bacteria gram-negativa, que se encuentra distribuida en la naturaleza; se ha observado en muestras de suelo, aguas prístinas y contaminadas, así como de plantas y animales. Todas las cepas son potencialmente patógenas para el hombre y algunas pueden infectar también a plantas y a invertebrados; una forma en la que se desarrolla en los platos de cultivo del laboratorio es como se observa en la siguiente figura.

Figura 36: *Pseudomonas aeruginosa*.



Fuente: Wikipedia.com. 20 de agosto, 2009

La *pseudomonas aeruginosa* es muy utilizada para compuestos orgánicos, como sustrato para crecer, lo que le permite desarrollarse en medios con escasez de nutrientes. También se ha documentado que esta *pseudomonas* se ha aislado de ambientes tan inhóspitos como el combustible de avión, soluciones de clorhexidina y el jabón.

A pesar de ser una bacteria mortal y asesina para el hombre, también es muy utilizada para el tratamiento de la contaminación ambiental. Diariamente, este microorganismo se encuentra en contacto con todo ser vivo, dado que muchos alimentos la contienen al igual que los productos de limpieza. Es usual encontrar este tipo de bacteria en personas sanas (del 2% al 8% de las heces); a pesar de no ser muy conocida por las personas la presencia de la bacteria, en condiciones especiales puede ser muy perjudicial para la salud.

Los estudios revelan que la inmunidad de esta bacteria es alta, por lo que sólo es sensible en un 30% a los antibióticos convencionales; esto sin duda da a entender que la *Pseudomonas aeruginosa* es muy resistente a los antibióticos más potentes, y una vez contraída evoluciona en tiempo récord complicando severamente distintos órganos del cuerpo (*enlacenacional.com, 20 de agosto, 2009*).

Esta *pseudomona* fue identificada de las muestras del reactor anaerobio del agua residual de la Tenería y estuvo presente tanto en medio aerobio como anaerobio; lo que demuestra la resistencia de la bacteria a pesar de encontrarse en un medio completamente anaerobio.

- ***Citrobacter sp.***

El género *Citrobacter* es un grupo de bacilos gram-negativos aerobios que se encuentran frecuentemente en el agua, suelo, comida y el tracto intestinal de animales y humanos, como flora saprófita.

En las pruebas que se realizaron a las muestras de aguas de la Tenería, esta bacteria fue aislada del agua del reactor anaerobio, a pesar de que se encuentra usualmente en medios aerobios; la forma como se observó en los platos del laboratorio se ilustra en la Figura 37. La bacteria *Citrobacter* junto con *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Escherichia* forma el grupo coliforme de bacterias entéricas.

Figura 37: *Citrobacter sp.*



Fuente: La autora.

Se sabe que estos microorganismos pueden producir infecciones importantes, especialmente en huéspedes inmunodepresivos. Son organismos ubicuos y son causa frecuente de infecciones en el hombre, en especial infecciones urinarias, meningitis neonatal y abscesos cerebrales. Es uno de los patógenos más



importantes en unidades de cuidados neonatales hospitalarios. Destruyen las microvellosidades, formando lesiones muy características denominadas de adherencia y eliminación.

- ***Ochrobactrum anthropi***

Es una bacteria gram-negativa, no esporulada, no fermentativa, con oxidasa y catalasa positiva. Es estrictamente aeróbica, móvil mediante flagelos, con metabolismo estrictamente respiratorio. En las pruebas específicas que se realizaron a las muestras de aguas residuales, este microorganismo estuvo presente en el agua residual filtrada del reactor aerobio del Condominio.

Este tipo de bacteria reduce los nitratos a compuestos gaseosos, incluyendo el nitrógeno gaseoso. El *ochrobactrum anthropi* se ha encontrado en diversos ambientes, ha sido aislado también en lodos activados. La temperatura de incubación oscila entre 10°C y 37°C; sin embargo, la temperatura óptima de crecimiento se ubica entre los 20° y 37°C. En muchos estudios con este tipo de microorganismo no se ha detectado que pueda sobrevivir por debajo de los 4°C o por encima de 45°C.

El crecimiento de esta bacteria se da en 24 horas y su tamaño generalmente es de aproximadamente 2 mm de diámetro. Dado que es una bacteria conocida recientemente, inicialmente se caracterizó como un miembro del género *Achromobacter*; sin embargo, posteriormente se determinó que forma parte del grupo *Rhizobiaceae*.

- ***Klebsiella oxytoca***

Es una especie Gram-negativa de bacteria, redondeadas, estrechamente relacionadas con *K. pneumoniae*, de la que se distingue por ser de índole positiva; tiene también ligeras diferencias de crecimiento en que es capaz de crecer en melecitosa, y no en 3-hidroxitirato. Este microorganismo se

identificó en la muestra de agua del reactor anaerobio del Condominio cuando tenía siete días de proceso de descontaminación; se ha determinado la existencia de este microorganismo en tratamiento como coagulación, floculación, sedimentación y filtración. Lamentablemente la información no indica la eficiencia con la que colabora en la descontaminación de aguas residuales.

- ***Brevundimonas diminuta***

Este tipo de bacteria es un gram-negativo; la temperatura a la que se da el crecimiento es de 26°C; la respiración que posee es estrictamente aeróbica; presenta movilidad dado que tiene flagelos que le permiten moverse en el medio donde se encuentre.

*Brevundimonas diminuta* se utiliza comúnmente como un organismo de prueba para la eficacia de los filtros de agua, debido al pequeño tamaño de la bacteria. Por otra parte, la *Pseudomonas diminuta* es sinónimo de *Brevundimonas diminuta*.

De igual manera que la bacteria *Klebsiella oxytoca*, este microorganismo se identificó en la muestra del reactor anaerobio del Condominio, a los treinta y cinco días, y fue de forma contraria a la respiración estrictamente aerobia que necesita para vivir; lo que indica que el reactor anaerobio no estaba completamente sellado y permitió el flujo de aire, para que pudiese vivir la *brevundimonas diminuta*.

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **VI.1. CONCLUSIONES**

Una vez que se han comparado los resultados de las pruebas físico-químicas, con la norma costarricense (Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales y Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Aguas Superficiales), se ha podido concluir que el agua no está en condiciones para que se pueda verter a un alcantarillado sanitario o a un cuerpo de agua; esto en virtud de que todas las pruebas fueron realizadas con muestras de las aguas residuales tomadas de los reactores biológicos de cada planta de tratamiento. Lo anterior vendría a ser como a la mitad del proceso de descontaminación total de los sistemas, por lo que el agua residual aún está con un alto nivel de contaminación.

A pesar de lo antes mencionado, hay que rescatar que algunas de las muestras de agua residuales cumplieron con algunos parámetros, como se observa en los Cuadros 7 y 8; en el caso de los Sólidos Suspendidos y Sedimentables, las aguas del Beneficio cumplieron muy por debajo de la norma, a diferencia de las aguas del Condominio y la Tenería. Por otra parte, parámetros como la conductividad con cuantías muy altas y OD con valores inferiores a los 8 mg/l, son indicadores de gran contaminación, y se reafirmó con la cantidad de nitrógeno amoniacal, amonio, amoniaco, fosfatos y nitratos que se observaron en cada una de las lecturas de las pruebas que se realizaron a las muestras de agua.

De las pruebas de DBO y DQO, se puede concluir que debido a los altos valores registrados (Cuadros 15 y 16), hay una gran concurrencia de bacterias; lo cual implica la necesidad de oxígeno para poder estabilizar las poblaciones de microorganismos; por lo que es determinante mantener una adecuada aeración, de los diferentes tipos de agua residual que se trate, dado que esto ayuda a mantener la distribución de bacterias a lo largo del área de los tanques y de esta manera se puede agilizar los procesos de eliminación de agentes contaminantes

y, para el caso de sistemas de tratamientos de aguas residuales con procesos anaerobios, se debe incrementar los microorganismos que pueden sobrevivir con respiración anaerobia y favorezcan la eliminación de contaminantes de las aguas.

Habiendo reconocido de forma hipotética la gran cantidad de microorganismos, con los resultados de las pruebas mencionadas anteriormente esto se confirmó, en los cultivos microbiológicos que se realizaron a las muestras de aguas residuales, y fue posible identificar quince diferentes tipos de bacterias de la población predominante en los platos de cultivo; para cada caso de agua, las bacterias que estuvieron en mayor proporción fueron las aeróbicas; lo que coincide con la respiración de la mayoría de los microorganismos que son del tipo gram-negativo.

Con los resultados de las pruebas microbiológicas, se pudo concluir que solo una de las bacterias fue coincidente en los tres diferentes tipos de aguas residuales, la *pseudomonas taetrolens*, perteneciente a la familia de las *pseudomonas*; no obstante, en la actualidad no existe suficiente información sobre las propiedades de esta bacteria y de los demás microorganismos obtenida de los muestreos, para reconocer las que favorecen la biorremediación de las aguas residuales (organismos que limpian el ambiente), e incrementar su desarrollo en las plantas de tratamiento.

Como se trabajó con tres tipos de plantas de tratamiento diferentes, las poblaciones bacterianas son muy diferentes, además de que únicamente se identificó la bacteria de la cepa predominante de los platos de cultivo; no obstante, algunas de las bacterias encontradas tienen la capacidad de desarrollarse en medios muy diversos, por lo que se podrían encontrar en casi cualquier tipo de agua residual.

De todas las bacterias encontradas, es favorable incrementar el crecimiento y desarrollo de bacterias como las *pseudomonas*, ya que pueden ayudar a los procesos de nitrificación; además son resistentes a condiciones adversas y

tienen la capacidad de garantizar con mayor seguridad el no perder el funcionamiento del tratamiento de descontaminación, en caso de una eventualidad que perjudique las condiciones del tanque. Además, son capaces de degradar materia tóxica del agua, sin sufrir cambios en las propiedades de su estructura.

En el agua del Beneficio se identificaron tres tipos de bacterias: las *pseudomonas sp*, las *pseudomonas florenscens* y las *pseudomonas taetrolens*; del agua de la Tenería se identificaron tres tipos: *pseudomonas aeruginosa*, *pseudomonas taetrolens* y *pseudomonas marginalis*; por último, para el agua del Condominio, a pesar de ser el agua con mayor diversidad de microorganismos, únicamente se identificaron la *pseudomona taetrolen* y la *pseudomona maculicula*.

Es importante mencionar que, a pesar de ser diferentes tipos de *pseudomonas*, al ser parte de la misma familia, poseen características similares en cuanto a degradación de agentes contaminantes; sin embargo, en la actualidad, solamente de la *pseudomonas aeruginosa* es posible saber a ciencia cierta la capacidad de degradar que posee, dada la diversidad de estudios que se han hecho con esta especie; para el resto de tipos de *pseudomonas*, es vasta la información en cuanto al daño que le pueden causar a los seres vivos si llegan a estar infectados con ellas, pero no sobre el impacto ambiental que genera el hecho de que estén presentes en suelos y aguas.

Sin embargo, para que la descontaminación tenga lugar, los microorganismos utilizados deben presentar una actividad adecuada. Para lograrlo, se deben generar las condiciones ambientales óptimas (nutrientes, temperatura, oxígeno, etc.) que favorezcan el crecimiento de la población de microorganismos. Esto, a su vez, provocará un aumento en la velocidad de biodegradación de los compuestos contaminantes, y con ello la detoxificación de las aguas o el medio. Además, el mantener microorganismos en los sistemas de descontaminación ayuda, específicamente, en procesos como la coagulación, floculación,

sedimentación y filtración, estudios específicos como Incidencia de Especies Bacterianas en los Efluentes de Plantas Potabilizadoras ([www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org), 2010) han demostrado que especies como la klebsiella (microorganismo identificado en aguas de las muestras del Condominio) favorecen procesos como los antes mencionados, hasta incluso la desinfección del agua potable.

Debido a que no fue posible la coincidencia en más de una bacteria entre las aguas de las tres diferentes plantas de tratamiento, se concluye que no se puede estandarizar recomendaciones en cuanto a operación y sistemas específicos del proceso de descontaminación de las diferentes aguas residuales, para incrementar o disminuir el crecimiento de microorganismos específicos; no obstante, es evidente que las plantas de tratamiento cuentan con un buen funcionamiento y cumplen con los parámetros físico-químicos que la norma costarricense regula.

Hoy Costa Rica no cuenta con la normativa suficiente que regule los contenidos de nutrientes dentro del Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales, de parámetros físico-químicos como el nitrógeno y fósforo en los efluentes o de bacterias que no sean únicamente coliformes; no obstante, se espera que en un futuro cercano estos y otros parámetros se incluyan dentro de la normativa, para ayudar a mejorar la calidad de los cuerpos receptores de las aguas y disminuir la contaminación tanto de cursos de agua, como de mantos acuíferos.

Por último, es de esperar que con tantos avances tecnológicos se logren implementar sistemas que favorezcan de mayor forma la descontaminación de las aguas residuales que se produzcan de diferentes procesos industriales o domésticos; sin embargo, las plantas que operan hoy deben mantener un control periódico y constante de las condiciones de funcionamiento y de los parámetros de control de contaminantes que regule la ley, para garantizar que el agua que se vaya a verter después de recorrer las plantas de tratamiento, no afectará en gran medida el medio ambiente.

## **VI.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar la identificación de bacterias en al menos tres plantas de tratamiento de igual efluente. Sería importante que el agua que se utilizara primero fuera la del tipo del Condominio, dado que al ser aguas residuales de tipo doméstico, las hay en todas partes donde vivan personas y además tienden a ser más homogéneas, para determinar si la coincidencia de bacterias es mayor y, de esa manera, poder realizarse una metodología de recomendaciones en cuanto al mantenimiento o eliminación de los microorganismos que se identifiquen; ya que en la investigación no se encontró nada más que una bacteria coincidente en todas las muestras de agua residual que se analizaron en el laboratorio.

Para el caso particular del proyecto, se trabajó con el agua de los reactores biológicos de cada una de las plantas de tratamiento; sin embargo, la investigación hubiese sido más completa si las pruebas también se hubiesen efectuado en los efluentes de las plantas de tratamiento, y así crear un marco comparativo de cuán eficiente es el proceso de descontaminación, una vez que las aguas tratadas salen de los reactores.

A pesar de haberse utilizado reactores anaerobios y aerobios para controlar, bajo condiciones de laboratorio, el proceso de descontaminación del agua residual por medio del crecimiento bacteriano, no se logra un adecuado funcionamiento de los procesos anaerobios y fue evidente en los resultados de OD, ya que son bajos los valores que se registraron de las pruebas; también pudo influir el que los reactores fueron fabricados con materiales que no contaban con cierres lo suficientemente herméticos; por lo que se recomienda que se pueda buscar equipo de última tecnología como el que se utiliza para hacer la simulación del reactor aerobio (Figura 27).

En Costa Rica, no existe regulación en cuanto a la cantidad de microorganismos que deben estar presentes en las aguas residuales que son vertidas a un

cuerpo de agua o a un alcantarillado sanitario, por lo que sería recomendable exhortar a instituciones como las municipalidades, Acueductos y Alcantarillados, entre otras, a solicitar estudios y reportes en los que se detalle cuáles son los microorganismos presentes en cada tipo de planta de tratamiento. Si se lograra implementar, sería posible crear una base de datos que sirva para comparar los estudios futuros. Y sería más completo aun si se realizara tanto en los efluentes, como en los procesos de la planta en los que se dé el tratamiento biológico; de esta manera, se podría cuantificar si los tratamientos finales de descontaminación eliminan por completo o en algún porcentaje los microorganismos identificados durante el funcionamiento de la planta, para así determinar qué impacto causará en el medio ambiente circundante en el que se deposite el agua, o en cuánto mejora la eficiencia de los procesos de descontaminación de los diferentes tipos de aguas residuales.

El implementar pruebas como las que se recomiendan en el párrafo anterior, incurren en un costo anual o semestral extra para las empresas que cuentan con plantas de tratamiento para aguas residuales; sin embargo, el costo de pruebas específicas como las que efectuaron en esta investigación, para poder determinar con qué clase de microorganismos cuentan los efluentes y procesos de descontaminación de la planta y así poder determinar si favorecen o no su presencia en la eliminación de contaminantes del agua, está muy por debajo del costo que tendría que pagar la empresa si se le impone una multa por incumplimiento de normativa, al incurrir en la contaminación de un alcantarillado sanitario o un cuerpo de agua receptor.

Es importante recomendar a Escuelas como la de Microbiología de la Universidad de Costa Rica, que proponga temas de investigación en los que se estudie en específico en cuánto ayuda o desfavorece la presencia de microorganismos en los procesos biológicos de descontaminación en las plantas de tratamiento, dado que internacionalmente lo que se menciona es muy poco y las fuentes de información nacional son casi inexistentes. Por lo general, lo que se menciona es la influencia de las bacterias en la salud de los seres



humanos o la cantidad de coliformes que contabilizaron en los efluentes de plantas de tratamiento; sin embargo, esto no especifica las especies de microorganismos presentes o el daño que puedan causar al medio circundante.

En países como Estados Unidos, actualmente se están realizando desarrollos biotecnológicos para el mejoramiento de los microorganismos empleados en la biorremediación, que podrían implementarse en proyectos de graduación de la Universidad de Costa Rica que trabajen en conjunto con municipalidades, Acueductos y Alcantarillados, RECOPE, entre otras instituciones. Algunos de los estudios son:

- Bacterias *Pseudomonas* transgénicas que son capaces de degradar compuestos tóxicos que contienen cloro (como el vinilcloruro) en compuestos menos nocivos.
- Bacterias capaces de degradar algunos de los componentes del petróleo, con la perspectiva de llegar a conseguir microorganismos que, liberados en una marea negra, limpien el agua contaminada.
- Bacterias capaces de reducir las formas altamente tóxicas de mercurio en otras menos tóxicas y volátiles
- Bacterias que transforman metales del suelo en formas menos tóxicas o insolubles. Por ejemplo: la reducción de cromo (Cr).
- Bacterias que pueden eliminar el azufre de los combustibles fósiles, como en el caso del carbón o del petróleo, con el fin de favorecer combustiones más limpias.
- Cianobacterias a las que se les han introducido genes de bacterias *Pseudomonas* con capacidad de degradar diferentes hidrocarburos o pesticidas.

La biorremediación mediante bacterias ofrece grandes posibilidades de limpiar y descontaminar sistemas complejos y, gracias a sus ventajas económicas y ambientales, será una de las tecnologías más desarrolladas durante este siglo; por lo que se recomienda a altos funcionarios de instituciones encargadas de velar por el medio ambiente y los procesos de descontaminación de las aguas residuales, domésticas, industriales o de cualquier tipo que implementen en el país los estudios y procesos de descontaminación que están a la vanguardia, para mejorar el estado del ambiente del país.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Henry, G; Heinke, G. Ingeniería Ambiental. Prentice Hall, México, 1999.
2. Matamoros Carvajal, Teresita. Valoración del uso de bacterias como removedoras de compuestos nitrogenados del agua. Informe de trabajo final de graduación para optar el título de bachiller en Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2004.
3. Metcalf y Eddy. Ingeniería de aguas residuales. Tercera edición, Mc Graw Hill. México. 1998.
4. Metcalf, Leonard y Eddy. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Segunda edición. Editorial Labor. España. 1981.
5. Murray, R, Patrick, Baron J. Manual of Clinical Microbiology. ASM PRESS, Washington, D.C. 2005.
6. Rittmann, M. Biotecnología del medio ambiente. McGraw-Hill, Madrid. 2001.
7. Rodríguez Moya, Dahiana. Evaluación físico-química del sistema de tratamiento de aguas residuales. Informe de práctica de especialidad para optar el título de bachiller en Ingeniería en Biotecnología del Instituto Tecnológico de Costa Rica. 2004.
8. Sawyer, N; McCarty,P y Parkin, G. Química para ingeniería ambiental. Cuarta edición, Mc Graw Hill. Colombia. 2001.
9. Ulate Ramírez, Edgar. Evaluación de un sistema de tratamiento terciario con plantas acuáticas. Informe final de proyecto de graduación para optar el grado de licenciatura en Ingeniería Civil de la

Universidad de Costa Rica. 2002.

10. Vidal, P. *Aireación aplicada a los requerimientos de la flora microbiana como herramienta para inducir nitrificación y desnitrificación en plantas de tratamiento de aguas residuales.* Proyecto de Graduación de la Universidad de Costa Rica. 2006.
11. Gómez, E. González, J. *Nuevos Confines de la Fijación Biológica de Nitrógeno.* X Reunión Nacional de Fijación de Nitrógeno. Granada, España. 2004.
12. Sternberg, M. y Lockwood, L. *Oxidation of Isomaltose by Pseudomonas taetrolens.* American Society for Microbiology. Journal of Bacteriology. 1969.
13. Zúñiga, Ana L. *Manual de Laboratorio de Ingeniería Ambiental.* Universidad de Costa Rica. 2007.

## VIII. REFERENCIAS

1. Aguamarker. 2009. *Microbiología ambiental*. Santiago, Chile. Disponible en: <<http://aguamarket.com/diccionario/terminos.aspId=2762>> Consultado: 8 de octubre, 2009.
2. AYMA. Agua y medio ambiente 2009. *Atlas de microorganismos*. Disponible en: <<http://ayma/atlas.htm>> Consultado: 8 de octubre, 2009. 12 de noviembre, 2009.
3. Wikipedia. *La Enciclopedia libre*. Disponible en: <<http://es.wikipedia.org>> Consultado: 7 de abril, 2009. 20 de agosto, 2009. 8 de octubre, 2009. 12 de noviembre, 2009.
4. Rodríguez, J. *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Disponible en: <<http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>> Consultado: 6 de marzo, 2009.
5. Hornick, L. *"Tree of Life"*. Disponible en: <<http://genome.jgi-psf.org/leume/leume.home.html>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
6. Enlace Nacional. *Pseudomona Aeruginosa*. Disponible en: <<http://enlacenacional.com>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
7. American Society of Microbiology. *Pseudomonas*. Disponible en: <<http://aem.asm.org/cgi/content/full/73/18/5959>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
8. Scientific electronic library online. *Chrobactrum anthropi*. Disponible en: <<http://scielo.isciii.es/scielo.php>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
9. Scientific electronic library online. *Klebsiella oxytoca*. Disponible en:

- <<http://scielo.isciii.es/scielo.php>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
10. Scientific electronic library online. *Pseudomonas*. Disponible en:  
<<http://scielo.isciii.es/scielo.php>> Consultado: 20 de agosto, 2009.
11. Fotografías Aéreas, Disponibles en: <[www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)>  
Consultado: 11 de septiembre, 2009.
12. Hidrocaven. *Esquema de planta de tratamiento de aguas residuales con aireación extendida.* Disponible en: <[www.hidrocaven.com](http://www.hidrocaven.com)>  
Consultado: 10 de septiembre, 2009.
13. El Cuaderno. *Biorremediación: Biotecnología y limpieza del medio ambiente.* Disponible en:  
<[http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec\\_46](http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_46)>  
Consultado: 12 de noviembre, 2009.
14. El Cuaderno. *Biorremediación: organismos que limpian el ambiente.*  
Disponible en:  
<[http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec\\_36](http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_36)>  
Consultado: 10 de octubre, 2009.
15. Influencia de Especies Bacterianas en Efluente de Plantas Potabilizadoras. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis>  
Consultado: 2 de enero, 2010.