



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Evaluación técnica y económica del reuso en sanitarios del agua  
tratada en dos configuraciones de plantas tipo paquete para el  
tratamiento de aguas residuales.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**Rodolfo Cortés Romero**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez**

**VOCAL:**               **Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara**

**SECRETARIO:**       **Profesor: Adalberto Noyola Robles**

**1er. SUPLENTE:**      **Profesor: Néstor Noé López Castillo**

**2° SUPLENTE:**       **Profesor: Alfonso Durán Moreno**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Adalberto Noyola Robles**

---

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**Ing. Roberto Briones Méndez**

---

**SUSTENTANTE:**

**Rodolfo Cortés Romero**

---

***Dedicatorias:***

A Dios, por estar conmigo cuando más lo he necesitado.

Esta tesis es dedicada a papá, mamá y Gaby porque ustedes han sido la mayor bendición que Dios me ha dado en este mundo.

A mi madre María Esther por estar siempre conmigo, por enseñarme a amar y ser el principal motor para jamás rendirme. Te quiero mucho mamá.

A mi padre Rodolfo por darme consejos valiosos, por enseñarme a valorar la vida y ser un ejemplo de vida para ser un hombre de bien. Te quiero mucho papá.

A mi hermana Gabriela, por ser mi eterna amiga, mi compañía, por el privilegio de tener una guía estupenda desde los primeros días de mi vida. Te quiero mucho Gaby.

*No les fallaré, jamás me rendiré y siempre lucharé hasta el último aliento.*

**Agradecimientos.**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi *alma máter* y por tener el privilegio de estar en la mejor universidad de Iberoamérica.

A la Facultad de Química, por abrirme sus puertas y tener el honor de estar en sus aulas.

Al Instituto de Ingeniería, por facilitarme sus instalaciones y apoyo económico para la realización de esta tesis.

Al Dr. Adalberto Noyola, por sus recomendaciones, observaciones, su tiempo invertido para la revisión de esta tesis y sobre todo por tener el gusto de estar dentro de su grupo de investigación. Le agradezco por haber confiado en mí.

A mis sinodales, por su tiempo y por sus correcciones pertinentes.

Al Ing. Roberto Briones: por sus consejos, su compañía, sus enseñanzas y todo el apoyo que me otorgó durante mi estancia en el Instituto. Ha sido un gran mentor para afinar mis aptitudes como ingeniero.

A M. en C. Margarita Cisneros: por su apoyo incondicional, confianza que tuvo conmigo durante mi estancia en el Instituto.

A mis compañeros y amigos del cubículo 418: Tania Gómez, Mauricio Magos, Alexandra Cerón, Daniel de los Cobos, Carolina Marini, Kathy Sibaja y demás chicos que estuvieron durante mi estancia en el Instituto. Gracias por sus consejos y apoyo, no solo en lo académico sino también en lo personal.

Al Dr. Milton Medeiros, Dr. Antonio Valiente y al Ing. Antonio Ortiz, por ser los pilares en mi formación como ingeniero y por enseñarme a amar la ingeniería química.

A Arturo Guillén, por ser mi hermano, porque siempre has estado conmigo cuando más lo necesito y siempre me has sacado una gran sonrisa con tus ocurrencias. Gracias por ser el amigo que nunca deja solo, por ser el amigo que siempre luchará a tu lado.

A Elena Villalba, por enseñarme a que siempre hay que sonreír. Por mostrarme a que en la vida no siempre uno tiene que ir en línea recta para ser feliz. Tu presencia llegó a mi vida como una gran bendición, gracias por todo Elenis.

A Xanat Melo, por acompañarme gran parte de la carrera, por motivarme a que puedo hacer cosas grandes en esta vida, por hacerme sonreír en varias ocasiones y por creer en mí. Gracias por haber dejado una huella importante en mi vida

A Jorge Ricardez, por apoyarme en los momentos más críticos de mi vida, por ser el amigo más antiguo que he conservado. Porque a pesar de ser rivales en los videojuegos, siempre me has extendido la mano y me has dado consejos valiosos para ser una mejor persona.

A Jonathan Onchi, por siempre ser mi amigo incondicional, porque a pesar de la hora, del día y el momento, siempre me has apoyado, escuchado y hecho reír para que pueda ser una persona más plena. Siempre me motivará la forma alegre de cómo vez la vida.

A María Teresa Valeriano, porque a pesar de los años, siempre has estado apoyándome desde el primer semestre que iniciamos esta aventura en la facultad de química.

A Lidia Pantoja, por tu sincera y efusiva amistad. Siempre ha sido una inyección de ánimo en momentos complicados y a pesar de los regaños siempre has estado presente.

A Mitchel Dehesa, por tu amistad que durante la carrera me hizo reír infinidad de ocasiones, además, tus consejos me sirvieron para madurar en muchos aspectos. Gracias por tu sinceridad y nobleza.

A mis queridos amigos que se han ganado un lugar en mi corazón y en mi memoria, porque de cada uno he aprendido, he reído y disfrutado de la vida: Fernando Álvarez, Enrique Paredes, Arnold Martínez, María José Córdova, Rodrigo Gutiérrez, Edgar Galicia, Guadalupe Meza, Emiliano Velasco aka. Evolkom, Michelle Gómez, Araceli Hernández, Eduardo de la Cruz, Daniel Cabrera, Mariano Martínez, Elva Pacheco, Sandra Maqueda, Adriana Santiago, Josele Rosas.

A Rodolfo Cortés Romero (yo), porque sin mi perseverancia, mis deseos de lucha y mis ganas de levantarme no hubiera llegado hasta donde estoy.

Finalmente, quiero agradecer a The Strokes, The Killers, Muse, Franz Ferdinand, entre otros grupos, por acompañarme con sus acordes y melodías durante mis noches de estudio, elaboración de prácticas y tareas. Sin ellos, seguramente me hubiera quedado dormido en más de una ocasión.

## Índice.

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lista de Tablas.....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Lista de Figuras. ....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>Resumen. ....</b>  | <b>12</b> |
| <b>1. Introducción. ....</b>  | <b>13</b> |
| 1.2 Objetivo General. ....  | 15        |
| 1.3 Objetivos Particulares.....                                       | 15        |
| <b>2. Marco teórico. ....</b>   | <b>16</b> |
| 2.1 Problemática actual mundial.....                                  | 16        |
| 2.2 Problemática actual en México.....                                | 19        |
| <b>2.3 Contaminación del agua. ....</b>                               | <b>20</b> |
| 2.3.1 Contaminación de acuerdo a su origen. ....                      | 20        |
| 2.3.2 Contaminación de acuerdo a su contaminante. ....                | 21        |
| <b>2.4 Clasificación de aguas residuales. ....</b>                    | <b>22</b> |
| 2.4.1 Agua residual doméstica. ....                                   | 22        |
| 2.4.2. Agua residual industrial. ....                                 | 23        |
| 2.4.3. Agua residual biológica. ....                                  | 23        |
| 2.4.4 Agua residual de origen pluvial. ....                           | 23        |
| 2.5. Constituyentes de las aguas residuales.....                      | 23        |
| 2.5.1 Características físicas.....                                    | 24        |
| 2.5.1.1 Sólidos. ....   | 24        |
| 2.5.1.2 Turbiedad. ....   | 24        |
| 2.5.1.3 Color.....  | 24        |
| 2.5.1.4 Olor.....   | 25        |
| 2.5.1.5 Temperatura.....  | 25        |
| 2.5.1.6 Conductividad. ....   | 25        |
| 2.5.2 Características químicas. ....                                  | 25        |
| 2.5.2.1 Características químicas inorgánicas. ....                    | 25        |
| 2.5.2.2 Características químicas orgánicas. ....                      | 26        |
| 2.5.3 Características biológicas. ....                                | 27        |
| 2.6 Tratamiento de aguas residuales. ....                             | 29        |
| 2.6.1 Pretratamiento y tratamiento primario de aguas residuales. .... | 30        |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.6.2 Tratamiento biológico.....   | 31        |
| 2.6.2.1 Métodos de tratamiento biológico.....  | 31        |
| 2.6.2.2 Metabolismo microbiano, energética y crecimiento.....  | 32        |
| 2.6.2.3 Remoción de nutrientes.....  | 33        |
| 2.6.2.4 Procesos anaerobios.....   | 34        |
| 2.6.2.5 Procesos aerobios.....   | 35        |
| 2.6.2.6 Selección de procesos aerobios y anaerobios.....   | 36        |
| 2.6.2.7 Lodos activados.....   | 38        |
| 2.7 Normatividad en reuso de aguas residuales.....   | 39        |
| 2.8 Planta de tratamiento de agua residual del edificio 12 y 18 del instituto de ingeniería de la UNAM. Un poco de historia..... | 42        |
| <b>3. Metodología.....</b>   | <b>43</b> |
| 3.1 Descripción del tren de tratamiento.....   | 43        |
| 3.2. Descripción de las operaciones unitarias.....   | 45        |
| 3.2.1 Cárcamo de bombeo.....   | 45        |
| 3.2.2 Tanque séptico.....  | 45        |
| 3.2.3 Plantas biológicas.....  | 47        |
| 3.2.3.1 Plantas paquete con aireación extendida (Planta 1 y Planta 2).....   | 47        |
| 3.2.3.2 Microplanta.....   | 49        |
| 3.2.4 Desinfección con cloro.....  | 52        |
| 3.2.5 Filtros.....   | 53        |
| 3.2.6 Luz UV.....  | 55        |
| 3.2.7 Recirculación de agua tratada hacia los edificios 12 y 18.....   | 57        |
| 3.3 Parámetros fisicoquímicos y biológicos.....  | 59        |
| 3.3.1 pH.....  | 60        |
| 3.3.2. Temperatura y oxígeno disuelto.....   | 61        |
| 3.3.3 Demanda química de oxígeno (DQO).....  | 61        |
| 3.3.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....   | 62        |
| 3.3.5 Sólidos.....   | 62        |
| 3.3.6 Turbidez.....  | 63        |
| 3.3.7 Conductividad.....   | 63        |
| 3.3.8 Coliformes fecales.....  | 63        |
| <b>4. Resultados y Análisis.....</b>   | <b>65</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 4.1 Tren de tratamiento.....  | 65         |
| 4.1.1 Tanque séptico.....   | 67         |
| 4.1.2 Plantas biológicas.....   | 67         |
| 4.1.3 Tratamiento terciario.....  | 68         |
| <b>4.2 Parámetros fisicoquímicos y biológicos.....</b>  | <b>70</b>  |
| 4.2.1 pH.....   | 70         |
| 4.2.2 Temperatura y Oxígeno Disuelto.....   | 72         |
| 4.2.3 Demanda Química de Oxígeno.....   | 74         |
| 4.2.3.1 DQO Total.....  | 75         |
| 4.2.3.2 DQO Soluble.....  | 78         |
| 4.2.3.3 Influencia de los eventos ocurridos de la PTAR en la DQO.....                         | 80         |
| 4.2.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> ).....                                  | 86         |
| 4.2.5 Sólidos suspendidos.....  | 87         |
| 4.2.5.1 Sólidos Suspendidos Totales.....  | 87         |
| 4.2.5.2 Relación SSV/SST.....   | 90         |
| 4.2.5.3 Sólidos disueltos fijos.....  | 91         |
| 4.2.6 Coliformes Fecales.....   | 94         |
| 4.2.7 Turbidez.....   | 96         |
| 4.2.8 Conductividad.....  | 97         |
| 4.2.9 Cloro Residual.....   | 98         |
| 4.3 Comparación de los resultados obtenidos durante el estudio, con trabajos anteriores.....  | 100        |
| 4.3.1 Comparación de parámetros fisicoquímicos de la microplanta con trabajos anteriores..... | 100        |
| 4.3.2 Comparación de parámetros fisicoquímicos de la PTAR con trabajos anteriores.....        | 102        |
| 4.4 Estudio económico.....  | 104        |
| 4.4.1 Inversión Total.....  | 104        |
| 4.4.2 Costos de operación.....  | 106        |
| 4.4.3 Costo de agua tratada.....  | 108        |
| 4.4.4 Viabilidad económica.....   | 109        |
| <b>5. Conclusiones y Recomendaciones.....</b>   | <b>112</b> |
| <b>6. Referencias citadas.....</b>  | <b>115</b> |

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>Anexo I.....</b>   | <b>119</b> |
| <b>Anexo II.....</b>  | <b>121</b> |
| <b>Anexo III.....</b> | <b>125</b> |
| <b>Anexo IV .....</b> | <b>128</b> |

## Lista de Tablas.

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2.1 Países con mayor consumo y porcentaje de principales usos (Conagua, 2010.).....   | 18  |
| Tabla 2.2 Agentes potencialmente infecciosos en agua residual doméstica no tratada.....   | 28  |
| Tabla 2.3 Lista de criterios aplicables para el tratamiento de agua residual (Marchaim, 1992.).....                                       | 36  |
| Tabla 2.4 comparación entre procesos aerobios y anaerobios (Waites et al., 2005).....   | 37  |
| Tabla 2.5 Lista de guías y/o regulaciones para el reúso de agua (Chaillou et al., 2010).....  | 40  |
| Tabla 2.6 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM003-SEMARNAT-1997)*.....   | 41  |
| Tabla 3.1 Frecuencia y puntos de muestreo de los parámetros fisicoquímicos.....   | 60  |
| Tabla 4.1 Resultados promedio y desviaciones estándar obtenidas de la operación de la planta de tratamiento de agua durante 382 días..... | 66  |
| Tabla 4.2 Evolución de la DBO <sub>5</sub> del filtrado, durante la operación de la PTAR.....   | 86  |
| Tabla 4.3 Valores promedio de los SST, SSV y SSV/SST, durante la operación de la PTAR.....  | 91  |
| Tabla 4.4 Evolución de los coliformes fecales en el filtrado, durante la operación de la PTAR.....  | 94  |
| Tabla 4.5 Valores promedio de la microplanta del primer trabajo (Márquez, 2004).....  | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 4.6 Valores promedio de la PTAR del segundo trabajo (Gómez, 2009).....                | 102 |
| Tabla 4.7 Costo de equipo para la PTAR.....   | 105 |
| Tabla 4.8 Costo total de la inversión para la PTAR.....                                     | 106 |
| Tabla 4.9 Costos de operación para la PTAR.....   | 107 |
| Tabla 4.10 Tarifa bimestral de agua potable (Código Fiscal del Distrito Federal, 2010)..... | 110 |
| Tabla A1.1 DQO promedio del primer periodo (170-215 días de operación).....                 | 119 |
| Tabla A1.2 DQO promedio del segundo periodo (293-375 días de operación).....                | 120 |
| Tabla A3.1 Depreciación anual de los equipos.....   | 125 |
| Tabla A3.2 Estado de Resultados.....  | 126 |
| Tabla A3.3. Flujo de efectivo.....  | 127 |

## Lista de Figuras.

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 Distribución global del agua (Conagua, 2010).....                                       | 17 |
| Figura 2.2 Degradación anaerobia en tres pasos de forma simplificada (Henze et al., 2002).....     | 35 |
| Figura 3.1 Diagrama de Flujo de proceso de la PTAR.....  | 44 |
| Figura 3.2 Cárcamo de bombeo de la PTAR.....   | 45 |
| Figura 3.3 Tanque Séptico y biofiltro (en segundo plano) de la PTAR.....                           | 46 |
| Figura 3.4 a) Bombas de alimentación, b) Tablero de control con los temporizadores.....            | 47 |
| Figura 3.5 Detalle de una planta paquete.....  | 48 |
| Figura 3.6 Detalle de válvula de purga.....  | 49 |
| Figura 3.7 Vista exterior de la microplanta.....   | 50 |
| Figura 3.8 Vista superior de la microplanta.....   | 51 |
| Figura 3.9 Bomba de diafragma positivo utilizada para la dosificación de hipoclorito de sodio..... | 52 |
| Figura 3.10 Detalle del equipo de filtración.....  | 53 |
| Figura 3.11 Diagrama interno del filtro.....   | 55 |
| Figura 3.12 Lámpara UV utilizada en la PTAR.....   | 56 |
| Figura 3.13 Bomba centrífuga e hidroneumático.....   | 57 |
| Figura 3.14 Bomba dosificadora (izquierda) y detector de flujo (derecha).....                      | 58 |
| Figura 3.15 Arreglo de tubería en el interior del edificio.....                                    | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.16 Vista aérea de la PTAR.....   | 59 |
| Figura 3.17 Muestra del Influyente, Filtrado y diferentes tonalidades del Filtrado con Colorante.....     | 64 |
| Figura 4.1 Evolución del pH durante la operación de la PTAR en el Influyente, Efluente y Filtrado.....    | 70 |
| Figura 4.2 Evolución del pH durante la evolución de la PTAR en las plantas biológicas.....                | 71 |
| Figura 4.3 Oxígeno disuelto en las plantas biológicas.....  | 72 |
| Figura 4.4 Temperatura en las plantas biológicas.....   | 73 |
| Figura 4.5 Evolución de la Demanda Química de Oxígeno Total en Influyente, Efluente y Filtrado.....       | 75 |
| Figura 4.6 Evolución de la Demanda Oxígeno Total en las plantas biológicas.....                           | 76 |
| Figura 4.7 Comparación de la DQO Total del influente y el filtrado durante los meses de operación.....    | 77 |
| Figura 4.8 Evolución de la Demanda Química de Oxígeno Soluble en el Influyente, Efluente y Filtrado.....  | 78 |
| Figura 4.9 Evolución de la Demanda Oxígeno Soluble en las plantas biológicas.....                         | 79 |
| Figura 4.10 Comparación de la DQO Soluble del influente y el filtrado durante los meses de operación..... | 80 |
| Figura 4.11 DQO total entre los días 170-215.....   | 81 |
| Figura 4.12 DQO soluble entre los días 170-215. ....  | 82 |
| Figura 4.13 DQO total entre los días 293-375.....   | 83 |
| Figura 4.14 DQO soluble entre los días 293-375.....   | 84 |
| Figura 4.15 Evolución de los Sólidos Suspendidos Totales el Influyente, Efluente y Filtrado.....          | 87 |
| Figura 4.16 Evolución de los Sólidos Suspendidos en las plantas biológicas.....                           | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.17 Comparación de los sólidos suspendidos totales del influente y el filtrado durante los meses de operación..... | 90  |
| Figura 4.18 Comparación de los sólidos disueltos fijos en el influente, efluente y filtrado.....                           | 92  |
| Figura 4.19 Comparación de los sólidos disueltos fijos en las plantas biológicas.....                                      | 93  |
| Figura 4.20 Evolución de la turbidez en el influente y el tanque séptico.....  | 96  |
| Figura 4.21 Evolución de la conductividad en el filtrado.....  | 97  |
| Figura 4.22 Evolución del cloro residual durante la operación de la PTAR.....  | 98  |
| Figura A2.1. Comportamiento del porcentaje de remoción de la $DQO_T$ .....   | 121 |
| Figura A2.2 Comportamiento del porcentaje de remoción de la $DQO_S$ .....  | 122 |
| Figura A2.3 Comportamiento del porcentaje de remoción de SST.....  | 123 |
| Figura A2.4 Comportamiento de los sólidos totales en el influente, efluente y filtrado.....                                | 124 |
| Figura A2.5 Comportamiento de los sólidos totales en las plantas biológicas.....   | 124 |
| Figura A4.1 Tablero de control.....  | 129 |

## Resumen.

En el 2007 se inició la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) a un costado de los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con una capacidad de tratamiento de 154.8 l/h. El propósito principal de esta PTAR es descargar un agua tratada que cumpla con la calidad establecida por la NOM-003-SEMARNAT-1997, y eventualmente para el reúso en los sanitarios de los edificios antes mencionados. En el 2008 se adicionó al tren de tratamiento y en paralelo, una planta biológica de tratamiento combinado (aerobio, anaerobio y anóxico) llamada microplanta (patente UNAM) y con ello se estableció una comparación entre los procesos ya instalados (lodos activados). Posteriormente, en el 2010 se instaló un equipo de luz UV y una bomba dosificadora de cloro, con el fin de realizar la desinfección del efluente. Durante el mismo año, se logró alcanzar una estabilidad de los valores obteniéndose datos por debajo de la norma; ante ello se tomó la decisión de recircular el agua hacia los sanitarios. Previo a la recirculación se realizó una campaña informativa de la calidad del agua y del funcionamiento de la planta a los usuarios de los edificios 12 y 18. Los resultados obtenidos en este estudio muestran que se alcanzaron remociones de DQO de 73% para la planta 1 y 2 y de 77% en la microplanta. En lo que respecta a los sólidos suspendidos totales se alcanzaron remociones de 80% para la planta 1 y 2, y de 83% para la microplanta. El efluente final (después del tratamiento terciario) alcanzó una remoción del 77% de DQO y 86% en la remoción de SST, con concentraciones promedio de ambos parámetros de 135 mgO<sub>2</sub>/l y 15 mg/l, mientras que la DBO<sub>5</sub> alcanzó una concentración promedio de 7 mgO<sub>2</sub>/L y no se detectaron coliformes fecales. Con estos resultados se cumple con lo establecido por la NOM003-SEMARNAT-1997 para el reúso del agua tratada con contacto directo. Finalmente, se realizó un estudio económico para determinar el costo del m<sup>3</sup> de agua tratada así como estimar la recuperación de la inversión inicial y establecer el ahorro de agua potable que se obtiene en los edificios al recircular el agua a los sanitarios, obteniendo un costo de \$63.28/m<sup>3</sup> de agua tratada y una recuperación a los 14 años.

## 1. Introducción.

En años recientes el ser humano se ha preocupado por el medio ambiente y ha intensificado el uso de herramientas biotecnológicas para mejorar su entorno, teniendo tecnologías más limpias y reduciendo los contaminantes en suelo, aire y agua. Esta preocupación se debe principalmente a que en los últimos 40 años el desarrollo industrial ha tenido un fuerte impacto ambiental no solo a nivel local o regional, sino a nivel mundial. Como resultado, se han incrementado acuerdos mundiales para reducir estos impactos, sin tener que detener el desarrollo industrial y tecnológico.

Las plantas de tratamiento de aguas se han convertido en una herramienta tecnológica muy útil para la preservación del medio ambiente, en el reúso de agua y control de enfermedades, especialmente de las gastrointestinales, por lo que su instalación debe ser una prioridad en la salud pública de los países. La tecnología de las plantas de tratamiento se ha ido mejorando a lo largo del tiempo y volviéndose más específicas dependiendo del tipo de agua residual a tratar, así como también del destino final de estas aguas. Sin embargo, cada planta de tratamiento de agua trae consigo algunos problemas, como es la generación de residuos sólidos (lodos) y la generación de malos olores, por lo que una planta de tratamiento debe ser integral y resolver sus problemas asociados.

Para el caso de las aguas residuales domésticas, éstas pueden provocar un problema de salud pública, especialmente en los países en vías de desarrollo, que al no contar con drenaje se incrementa el riesgo de contraer enfermedades, debido a que la población crece a una mayor tasa que el suministro de servicios y la urbanización de las ciudades.

En este contexto, donde las limitaciones económicas y técnicas son las principales causas del rezago en los servicios de saneamiento, es necesario tener soluciones que garanticen la eliminación y tratamiento de las aguas residuales con una inversión y con un costo de operación mínimos. Los sistemas descentralizados

son la opción para pequeñas comunidades que no se encuentran dentro de la red de los sistemas centralizados o de las grandes plantas de tratamiento.

Las condiciones sociales, económicas y ambientales del medio mexicano exigen que se consideren en el diseño de pequeñas plantas de tratamiento, un diseño adecuado con márgenes de crecimiento, que tengan un costo bajo de inversión, operación y mantenimiento, pero sobretodo que tengan la eficacia para cumplir la normatividad vigente (Márquez *et al.*, 1998).

En este trabajo se evaluó la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales que recircula el agua a los sanitarios de los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como la comparación del efluente final con la NOM 003-SEMARNAT-1997. También se verificó la viabilidad económica del proyecto para poder instalar el mismo sistema en otros edificios dentro de Ciudad Universitaria.

## **1.2 Objetivo General.**

Evaluar el comportamiento durante el arranque de una planta de tratamiento ubicada en el edificio 12 y 18 del Instituto de Ingeniería, con la finalidad que se cumplan los requerimientos de calidad de acuerdo a la NOM-003-SEMARNAT-1997 para reutilizar el efluente tratado en los sanitarios.

## **1.3 Objetivos Particulares.**

- Monitorear la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, mediante la realización de pruebas fisicoquímicas y biológicas.
- Determinar el porcentaje de remoción de materia orgánica en los diferentes puntos de muestreo y compararlos con la NOM003-SEMARNAT-1997.
- Estimar el costo por metro cúbico de agua tratada y determinar el ahorro de agua potable en este tipo de sistema descentralizado.

## 2. Marco teórico.

En el presente capítulo se hace una revisión bibliográfica relacionada con el tema de estudio. En los primeros subtemas se hace mención sobre la problemática de México y el mundo sobre la falta de agua, posteriormente se menciona la contaminación del agua, su clasificación y características de acuerdo a sus contaminantes. En el siguiente punto del marco teórico se mencionan los componentes del agua residual, para continuar sobre las generalidades sobre el tratamiento de aguas residuales, especialmente el tratamiento biológico. También se hace referencia a la normatividad vigente en algunos países y en México sobre el reúso de agua tratada. Finalmente, se comenta sobre los antecedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

### 2.1 Problemática actual mundial.

Los recursos energéticos y el agua son de los temas más importantes en la mayoría de los países del mundo. De hecho la escasez o falta de agua potable es de particular interés en el desarrollo de los países. Este fenómeno se debe al crecimiento de la población, la urbanización de zonas rurales, el alto consumo de agua y finalmente a los cambios climáticos (Chaillou *et al.*, 2010).

En 1950, la población mundial ascendía a 2 535 millones de personas, mientras que para 2005, había aumentado a 6 515 millones. A fines del 2011 la población mundial alcanzó los 7,000 millones. Se estima que este crecimiento futuro se concentrará principalmente en los países menos desarrollados, donde la población está creciendo a un ritmo cinco veces superior en comparación al de los países desarrollados.

Este incremento de población se debió principalmente a una mejor infraestructura en lo que se refiere a obras públicas (alcantarillado, alumbrado, etc.) y una mejor

calidad y mayor esperanza de vida. Sin embargo, los recursos hídricos se han visto afectados a causa de este crecimiento.

Actualmente la disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1386 millones de  $\text{km}^3$ , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, o 35 millones de  $\text{km}^3$ , es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano. El agua que está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva. La figura 2.1 muestra la distribución global de agua en el mundo.

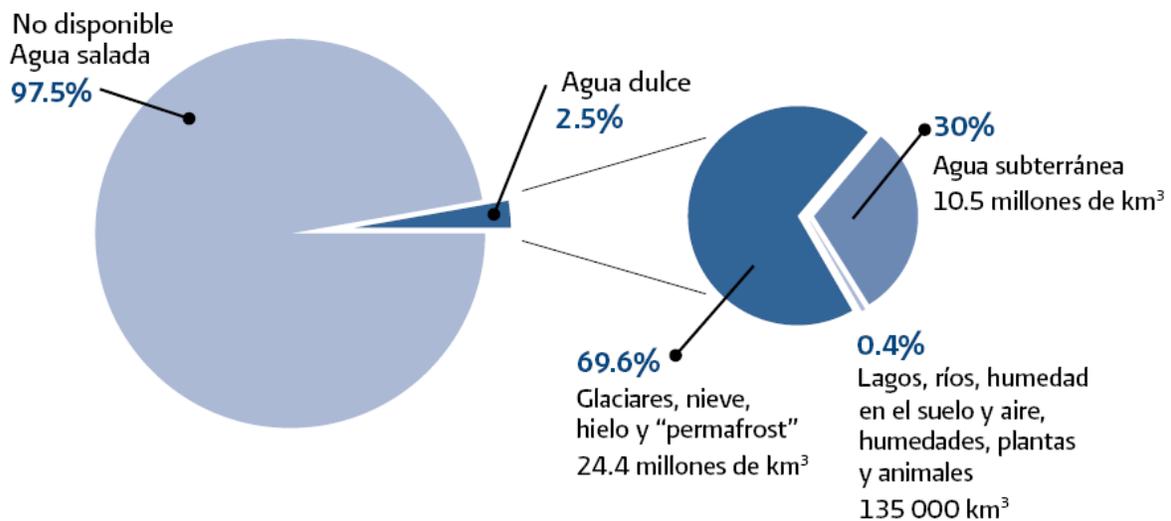


Figura 2.1 Distribución global del agua (Conagua, 2010).

El principal uso del recurso hídrico a nivel mundial, conforme a estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, FAO (por sus siglas en inglés), es el agrícola, con el 72% de la extracción total. Otros usos importantes son la industria y el abastecimiento público. En la tabla 2.1 se muestra a los países con mayor consumo de agua.

Tabla 2.1 Países con mayor consumo y porcentaje de principales usos (Conagua, 2010)

| No       | País                      | Extracción total de agua (km <sup>3</sup> /año) | % Uso agrícola | % Uso industrial | % Uso abastecimiento público |
|----------|---------------------------|---|----------------|------------------|------------------------------|
| 1        | India                     | 645.8   | 86.5           | 8.1              | 5.5                          |
| 2        | China                     | 630.3   | 67.7           | 6.6              | 25.7                         |
| 3        | Estados Unidos de América | 479.3   | 41.3           | 12.7             | 46.0                         |
| 4        | Pakistán                  | 169.4   | 96.0           | 1.9              | 2.0                          |
| 5        | Japón                     | 88.4  | 62.5           | 19.7             | 17.9                         |
| 6        | Tailandia                 | 87.1  | 95.0           | 2.5              | 2.5                          |
| 7        | Indonesia                 | 82.8  | 91.3           | 8.0              | 0.7                          |
| <b>8</b> | <b>México</b>             | <b>79.8</b>                                     | <b>76.8</b>    | <b>14.0</b>      | <b>9.2</b>                   |
| 9        | Bangladesh                | 79.4  | 96.2           | 3.2              | 0.7                          |
| 10       | Rusia                     | 76.7  | 17.8           | 18.8             | 63.5                         |

Otro problema es la contaminación del agua, que va muy ligado al consumo de agua para las industrias. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), el agua está contaminada cuando su composición se encuentra alterado de modo que no reúna las condiciones necesarias para ser utilizada beneficiosamente en el consumo del humano y de los animales. A raíz de este problema se ha dado la necesidad de construir plantas de tratamiento, con el fin de que los efluentes finales tengan un menor impacto ambiental y en algunos casos hasta se pueda volver a reutilizar el agua tratada. Actualmente, en varias partes del mundo se han construido grandes plantas de tratamiento, cubriendo así las necesidades de tratamiento de los grandes efluentes provenientes de ciudades o grandes parques industriales, aunque en los últimos tiempos ha surgido la necesidad de implementar plantas de tratamiento pequeñas con el fin de descentralizar el manejo de aguas residuales.

El sistema descentralizado de manejo de las aguas residuales (SDMAR) se define como la recolección, tratamiento y vertimiento o reutilización de aguas residuales provenientes de hogares, conjuntos habitacionales, comunidades asiladas,

industrias o instituciones, así como también de sectores de comunidades existentes cerca del punto de generación de residuos (Tchobanoglous, 2000).

Los objetivos principales del SDMAR son:

- 1) Proteger la salud pública.
- 2) Proteger de la degradación o de la contaminación al ambiente receptor.
- 3) Reducir los costos de tratamiento mediante la retención de aguas y sólidos cerca de su punto y reutilizarlos.

## **2.2 Problemática actual en México.**

En México y como en todo el mundo, el suministro de los servicios de agua potable y alcantarillado a la población, así como al tratamiento de las aguas residuales están relacionados con el bienestar social. Es importante siempre tener presente que dos terceras partes del territorio nacional son áridas o semiáridas, esto obliga al uso eficiente del agua en todas las actividades, tanto en el riego como en la industria. La situación anterior cobra especial relevancia si se considera que la población del país se ha cuadruplicado en los últimos 55 años.

En lo que se refiere a los usos del agua, el volumen concesionado a diciembre de 2006, sin incluir la generación de energía hidroeléctrica, era de 77,321 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2010). En México como en otros lugares del mundo, el agua se contamina principalmente por tres fuentes de contaminación:

- A) Sector social. Corresponde a las descargas de residuos de origen doméstico y público que constituyen las aguas residuales municipales. El 60 % de la población mexicana está concentrada en las grandes ciudades. Se calcula que el 57 % de las aguas residuales son generadas por la población, principalmente por las zonas localizadas en torno a las ciudades de México (23 %), Monterrey (4.1 %) y Guadalajara (4 %). Se estima que en México se tiene el 86% de cobertura de alcantarillado.

B) Sector industrial. La industria en general, genera alrededor de 43% de aguas residuales.

C) Sector agropecuario. Corresponde a las instalaciones dedicadas a la crianza y engorda del ganado y a las aguas de retorno en los campos agrícolas, se estima que se genera el 12% de aguas residuales en este sector.

Actualmente existen 1,833 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, distribuidas por todo el territorio nacional, las cuales trataron  $83.6\text{m}^3/\text{s}$ , es decir el 40% de los  $208\text{m}^3/\text{s}$ , recolectados en los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2010).

## **2.3 Contaminación del agua.**

Como se ha mencionado en puntos anteriores, el agua se contamina por diferentes fuentes que se clasifican en dos puntos, de acuerdo a su origen y de acuerdo a su tipo de contaminante.

### **2.3.1 Contaminación de acuerdo a su origen.**

La contaminación de acuerdo a su origen son aquellas que pueden provenir por causas naturales o provocadas por el hombre.

Origen Natural. Son las fuentes que provienen de la naturaleza, como las erupciones volcánicas marinas, yacimientos subterráneos tóxicos, erosión, entre otros. La característica de las causas naturales es que son muy dispersas y no provocan concentraciones altas de polución, excepto en algunos lugares muy concretos.

Origen Antropogénico. Son las provocadas directa o indirectamente por el hombre. Por ejemplo descargas de efluentes de industrias, municipales, ganaderos (García, 2009).

### 2.3.2 Contaminación de acuerdo a su contaminante.

Contaminación Orgánica. Son contaminantes con gran cantidad de materia orgánica en especial sustancias con carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, pueden ser diversos productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas, etc. Los contaminantes orgánicos provocan la proliferación de microorganismos que consumen el oxígeno disuelto en el agua y afecta la vida acuática.

Contaminación Biológica. Es el contaminante que contiene excrementos humanos, animales y muchas veces de desechos de hospitales que son transmisores de organismos patógenos como los virus, bacterias, hongos, parásitos y protozoarios. Estos microorganismos son altamente peligrosos al contacto con los seres vivos y pueden provocar en el hombre enfermedades como Hepatitis, cólera, enteritis, polio, entre otras.

Contaminación Tóxica. Son contaminantes que contienen metales pesados como plomo, cadmio, mercurio, ciertos plaguicidas, los cianuros, que provocan la destrucción de los ecosistemas acuáticos y así daño severo al contrato con el hombre.

Contaminación Inorgánica. Son diversos productos disueltos o dispersos en el agua que provienen de descargas domésticas, agrícolas e industriales o de la erosión del suelo. Estos compuestos contienen cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos. También desechos ácidos, alcalinos y gases tóxicos disueltos en el agua como los óxidos de azufre, de nitrógeno, amoníaco, cloro y sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico).

Contaminación Térmica. Es cuando un proceso altera la temperatura del medio de forma indeseada o perjudicial. Al aumentar la temperatura, existe un cambio de

densidad en el agua y por consiguiente una disminución de la concentración de oxígeno. Las centrales termoeléctricas contribuyen a este tipo de contaminación.

## **2.4 Clasificación de aguas residuales.**

Las aguas residuales son aquellas aguas provenientes de industrias, zonas habitadas, agrícolas que contienen cierta cantidad de contaminantes que alteran el medio ambiente. Tienen una clasificación de acuerdo a la fuente generadora de la misma, es decir, de acuerdo al uso que se le dio al agua, y de ello van a depender su composición y sus características, así como el tratamiento al que deberá ser sometida.

### **2.4.1 Agua residual doméstica.**

Es el agua descargada de zonas residenciales, oficinas, centros comerciales. Esta agua está compuesta por desechos del cuerpo humano (orina, heces fecales), lavado de ropa, lavado de platos. En muchas ocasiones esta agua se puede dividir en dos sub clasificaciones.

- Aguas negras. Son las aguas procedentes de vertidos cloacales, de instalaciones de saneamiento; son líquidos con materia orgánica, fecal y orina, que circulan por el alcantarillado.
- Aguas grises. Es el agua que proviene de las regaderas, lavamanos, lavadoras y residuos de comida, esta agua no incluye el agua proveniente de los excusados (Jefferson *et al.*, 1999; Eriksson *et al.*, 2002).

#### 2.4.2. Agua residual industrial.

Es el agua que proviene de cualquier sector industrial, la composición o características de esta agua es muy variada, porque va a depender del tipo de industria que se esta desechando (Salvato *et al.*, 2003).

#### 2.4.3. Agua residual biológica.

Esta agua se caracteriza por presentar concentraciones altas de microorganismos que resultan peligrosos para la salud. Proviene principalmente de hospitales, laboratorios clínicos. Aquí también se incluye el agua proveniente de los sanitarios.

#### 2.4.4 Agua residual de origen pluvial.

Es el agua provocada por el deshielo o por el escurrimiento superficial de las lluvias, su volumen depende de la intensidad de la precipitación o la topografía.

El agua residual pluvial por su origen no debería ser considerada como agua residual, pero debido a su alta carga de contaminantes al arrastrar residuos y sedimentos de los terrenos que drena, así como al ser mezclada con otro tipo de agua residual o por la acidez que presenta la lluvia ácida, si es considerada como tal.

### **2.5. Constituyentes de las aguas residuales.**

El agua residual contiene una amplia gama de productos que es necesario remover para que se pueda tener contacto con los seres vivos o para proteger los cuerpos receptores. Por eso es necesario tener en cuenta que contaminantes contiene el agua a tratar para que se pueda establecer un tren de tratamiento eficiente y específico para cada tipo de agua residual. Los constituyentes de las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos.

## 2.5.1 Características físicas.

Las principales características físicas de un agua residual, son el contenido de sólidos, turbiedad, color, olor, temperatura y conductividad.

### 2.5.1.1 Sólidos.

El agua residual posee una variedad de materias sólidos que varían desde hilachas hasta materiales coloidales. En la caracterización de las aguas residuales, los materiales gruesos son removidos generalmente antes de analizar los sólidos en la muestra. En aguas negras los sólidos más comunes es la materia fecal con diferentes diámetros de partículas.

### 2.5.1.2 Turbiedad.

Es una medida de las propiedades de dispersión de la luz del agua, y es otro parámetro usado para indicar la calidad de las aguas residuales tratadas y del agua potable, con relación al material residual en suspensión coloidal. La mayor turbiedad está asociada con partículas de tamaño inferior a 3  $\mu\text{m}$  y especialmente con aquellas partículas de tamaño entre 0.1 y 1.0  $\mu\text{m}$ .

### 2.5.1.3 Color.

El color en las aguas residuales es causado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por sólidos suspendidos se llama *color aparente* mientras que el color causado por las sustancias disueltas y coloidales se denomina *color verdadero*. En forma cualitativa, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual.

#### 2.5.1.4 Olor.

El olor en un agua residual fresca es en general inofensivo, pero una gran variedad de compuestos malolientes son liberados cuando se produce la degradación biológica bajo condiciones anaerobias de las aguas residuales. El principal compuesto de olor indeseable es el ácido sulfhídrico, pero existen otros compuestos como indol, eskatol y mercaptanos, formados bajo condiciones anaerobias (WEF, 1995).

#### 2.5.1.5 Temperatura.

La temperatura del agua residual es por lo general mayor que la temperatura del agua para abastecimiento como consecuencia de la incorporación de agua caliente proveniente de uso doméstico e industrial.

#### 2.5.1.6 Conductividad.

Generalmente las aguas residuales contienen sales provenientes de desechos domésticos o de industrias. La conductividad es una medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica.

### 2.5.2 Características químicas.

Las características químicas se dividen en dos grupos, los constituyentes inorgánicos y orgánicos.

#### 2.5.2.1 Características químicas inorgánicas.

Los compuestos inorgánicos incluyen elementos individuales como el calcio (Ca), cloruro (Cl), hierro (Fe), cromo (Cr) y zinc (Zn) y una amplia variedad de compuestos como nitratos ( $\text{NO}_3$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4$ ).

Los compuestos inorgánicos de interés comprenden nutrientes, constituyentes no metálicos, metales y gases. Entre los nutrientes inorgánicos están amoníaco libre

y en forma de ion amonio, nitritos, nitratos, fósforo inorgánico. Otras pruebas como el pH y la alcalinidad, cloruros y sulfatos son realizadas para estimar la capacidad de reutilización de aguas residuales tratadas.

#### *2.5.2.2 Características químicas orgánicas.*

La materia orgánica en aguas residuales municipales se constituye básicamente de proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 a 50%), y grasas y aceites (8 a 12%). La urea, el mayor constituyente de la orina, es otro componente orgánico importante que hace parte de las aguas residuales frescas. Dada su rápida descomposición no es usual encontrarla en otro tipo de aguas. Además de proteínas, carbohidratos, grasas y aceites las aguas residuales contienen pequeñas cantidades de un gran número de moléculas orgánicas sintéticas, con estructuras que van desde las más simples hasta las extremadamente complejas. A través de los años se han desarrollado diferentes análisis para determinar el contenido de materia orgánica en aguas residuales. En general, los análisis se pueden clasificar en aquellos usados para medir cantidades de materia orgánica agregada compuesta por constituyentes de similares características y los que cuantifican los compuestos orgánicos en forma individual (Standard Methods, 1998).

Los análisis de compuestos orgánicos agregados se hacen para caracterizar aguas residuales tratadas y no tratadas, para estimar el desempeño de los procesos de tratamiento y estudiar su comportamiento en las fuentes receptoras. Actualmente, los métodos de laboratorio comúnmente usados para medir cantidad de materia orgánica en aguas residuales incluyen:

- Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Carbono orgánico total (COT)

### 2.5.3 Características biológicas.

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano, y por el papel activo y fundamental de las bacterias y otros microorganismos dentro de la descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural o en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Los principales grupos de organismos presentes en aguas superficiales y aguas residuales están conformados por bacterias, hongos, algas, protozoos y virus. Los organismos patógenos presentes en las aguas residuales pueden provenir de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una enfermedad determinada. Las principales clases de organismos patógenos que se encuentran en aguas residuales son bacterias, parásitos y virus. En la tabla 2.2 se muestra información sobre agentes potencialmente infecciosos presentes en agua residual doméstica no tratada.

Tabla 2.2 Agentes potencialmente infecciosos en agua residual doméstica no tratada.

| Organismo                      | Enfermedad           | Síntomas   |
|--------------------------------|----------------------|--|
| <b>Bacterias</b>               |                      |  |
| <i>Campylobacter jejuni</i>    | Gastroenteritis      | Diarrea  |
| <i>Escherichia coli</i>        | Gastroenteritis      | Diarrea  |
| <i>Legionella pneumophila</i>  | Legionelosis         | Malestar, fiebre, dolor de cabeza, enfermedades respiratorias agudas |
| <i>Salmonella</i>              | Salmonellosis        | Envenenamiento por comida  |
| <i>Vibrio cholerae</i>         | Cólera               | Diarrea aguda, deshidratación  |
| <b>Protozoos</b>               |                      |  |
| <i>Balantidium coli</i>        | Balantidiasis        | Diarrea, disentería  |
| <i>Cryptosporidium parvum</i>  | Criptosporidiasis    | Diarrea  |
| <b>Helmintos</b>               |                      |  |
| <i>Ascaris lumbricoides</i>    | Ascariasis           | Infestación de gusanos intestinales                                  |
| <i>Enterobius vermicularis</i> | Enterobiasis         | Gusanos  |
| <b>Virus</b>                   |                      |  |
| <i>Hepatitis A</i>             | Hepatitis infecciosa |  |
| <i>Parvovirus</i>              | Gastroenteritis      | Ictericia, fiebre, vómito  |
| <i>Rotavirus</i>               | Gastroenteritis      |  |

## 2.6 Tratamiento de aguas residuales.

Para el tratamiento de aguas residuales existen una gran variedad de procesos y de operaciones unitarias que, con una adecuada selección y dependiendo del origen del agua, se puede lograr una adecuada remoción de contaminantes.

Los contaminantes en el agua pueden ser removidos por tres tipos de tratamientos: biológicos, químicos y físicos. Cada tratamiento posee diferentes operaciones o procesos unitarios que generalmente se combinan para obtener una mejor calidad en los efluentes.

Las operaciones unitarias físicas, históricamente fueron las primeras que se utilizaron para el tratamiento de aguas residuales. Su principio recae en las fuerzas físicas. Ejemplos de estas es la sedimentación, el cribado, el mezclado, el filtrado, entre otras. Los procesos unitarios químicos realizan la remoción de contaminantes con base en la adicción de compuestos químicos y su respectiva reacción. Algunos de los procesos químicos por mencionar son la coagulación, la electrocoagulación, oxidación foto-catalítica, intercambio iónico. Finalmente, se tienen los procesos biológicos, que con la ayuda de la actividad biológica de los microorganismos, se logra la degradación de los contaminantes.

La selección de los procesos de tratamiento de aguas residuales depende de algunos factores entre los que destacan (Ramahlo, 1991):

- a) Características del agua residual: DBO, materia orgánica en suspensión, pH y productos tóxicos.
- b) Calidad de salida del efluente requerido.
- c) Costo y disponibilidad de terreno.
- d) Consideración de futuras ampliaciones y previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, que necesiten el diseño de tratamientos más sofisticados en el futuro.

Actualmente, las operaciones unitarias así como los procesos unitarios se agrupan para llevar a cabo tratamiento primario, secundario y avanzado. En el tratamiento

primario se remueven los sólidos suspendidos y sedimentables encontrados en el agua de desecho, mediante operaciones físicas como sedimentación y cribados. En el tratamiento secundario, los procesos biológicos y químicos son utilizados para remover la mayor parte de la materia orgánica. Finalmente en el tratamiento avanzado, se utiliza una combinación de operaciones unitarias y procesos unitarios para remover otros constituyentes, como nitrógeno y fósforo, los cuales no son reducidos considerablemente por los tratamientos anteriores (Winkler, 1996).

#### 2.6.1 Pretratamiento y tratamiento primario de aguas residuales.

El pretratamiento ocurre a través de una secuencia de unidades de tratamiento encargadas de modificar la distribución del tamaño de las partículas presentes en el agua residual, tales como trapos, palos, arena, materia flotable y grasa que pueda causar problemas de mantenimiento u operacionales en los sistemas de tratamiento. Algunos dispositivos de pretratamiento utilizados son rejas y cribas de barras, desarenadores, entre otros.

El tratamiento primario consiste en la remoción de materia suspendida o sedimentable a través de medios físicos y mecánicos. Con este tratamiento se reduce más del 30% la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y 60% de los sólidos en suspensión. Algunas operaciones y dispositivos utilizados son los mezcladores y la fosa séptica, cuyo principio es la sedimentación.

La sedimentación consiste en la caída por gravedad de los sólidos o partículas de mayor tamaño que contiene el agua residual. Como el tiempo de detención de las cámaras de sedimentación suele ser de 2 a 4 horas, sólo se eliminan las partículas que se sedimentan en ese lapso. Las cámaras o tanques de sedimentación suelen ser rectangulares o circulares, con un flujo radial o ascendente. En algunos casos, el lodo que se extrae del fondo para evitar una saturación de lodos en el fondo (Mackenzie, 2005).

Los tanques sépticos se usan principalmente en el tratamiento de aguas residuales de viviendas individuales; su uso se ha extendido a otros sectores,

modificando sólo el tamaño de los tanques. Los sólidos sedimentables que se encuentran en el agua residual cruda forman una capa de lodo en el fondo del tanque séptico. Las grasas, aceites y demás material ligero tienden a acumularse en la superficie donde forman una capa flotante de espuma en la parte superior y la capa de lodo sedimentado en el fondo. La materia orgánica retenida en el fondo del tanque se somete a un proceso de descomposición anaerobia y facultativa, transformándose en compuestos y gases más estables como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ).

#### 2.6.2 Tratamiento biológico.

Los objetivos principales del tratamiento biológico son estabilizar la materia orgánica y coagular y remover los sólidos coloidales que no sedimentan. Dependiendo de las circunstancias se puede incluir a la remoción de nutrientes, como el nitrógeno, fósforo, así como rastros de compuestos orgánicos. El tratamiento biológico comprende:

- a) La conversión de la materia orgánica carbonácea disuelta y en estado coloidal en diferentes gases y tejidos celulares.
- b) La formación de Lodos biológicos compuestos de materia celular y de los coloides orgánicos presentes en las aguas residuales.
- c) La subsecuente remoción de dichos lodos por medio de sedimentación por gravedad.

Con el paso de los años se ha encontrado, que con análisis adecuado y control ambiental, una gran variedad de aguas residuales se pueden tratar biológicamente.

##### 2.6.2.1 Métodos de tratamiento biológico.

Se emplean cuando los principales contaminantes del agua son orgánicos biodegradables, así como unos aniones inorgánicos (nitratos, nitritos, fosfatos). En esas condiciones las aguas municipales y algún tipo de aguas industriales, pueden tratarse biológicamente.

Estos procesos se dividen en cuatro grupos, los aerobios, los anaerobios, los anóxicos y los híbridos. Los primeros se caracterizan por degradar la materia orgánica mediante el suministro de oxígeno, llevándola en su mayoría a síntesis de nuevas células y producción de  $\text{CO}_2$ , mientras que los anaerobios, en ausencia de oxígeno molecular degradan la materia orgánica en un 90% a metano (fuente de energía) y el 10% restante a la producción de biomasa. El proceso anóxico es en el cual el nitrógeno de los nitratos se convierte biológicamente en nitrógeno gaseoso en ausencia de oxígeno. Finalmente los procesos híbridos son diferentes combinaciones de procesos aerobios, anaerobios y anóxicos agrupados con el fin de conseguir un objetivo particular.

#### *2.6.2.2 Metabolismo microbiano, energética y crecimiento.*

El proceso que permite a los microorganismos crecer y obtener energía es complejo; existen muchas vías y ciclos. Las dos reacciones principales que conforman el proceso metabólico se conocen como reacciones catabólicas y reacciones anabólicas. Las reacciones catabólicas producen la descomposición de moléculas orgánicas complejas en sustancias simples, junto con la liberación de energía. Las reacciones anabólicas permiten la formación de más moléculas complejas (síntesis), y generalmente requieren energía. La energía para las reacciones anabólicas se obtiene de las reacciones catabólicas.

Se necesita energía para llevar a cabo las reacciones bioquímicas de la célula. Esta proviene de la oxidación de la materia orgánica e inorgánica (reacciones catabólicas) o por medio de una reacción fotosintética. Ciertos compuestos orgánicos atrapan la energía liberada, el compuesto de almacenamiento más común es la adenosina trifosfato (ATP). La energía capturada por este compuesto se utiliza en la síntesis, mantenimiento y movilidad de la célula. Cuando la molécula de ATP ha gastado la energía que capturó en las reacciones anabólicas que participan en la síntesis celular y en el mantenimiento de la célula, cambia a un estado de baja energía llamado adenosina difosfato (ADP). Esta molécula de ADP puede capturar otra vez energía liberada en la descomposición de la materia

orgánica o inorgánica, recobrando su estado energético como molécula de ATP. Este proceso aplica para organismos anaerobios y aerobios.

Las bacterias necesitan nutrientes para el crecimiento, principalmente nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes pueden no siempre estar presentes en cantidades suficientes, como en el caso de los desechos industriales con alto contenido de carbohidratos. Si ese es el caso, hay que adicionar los nutrientes en las cantidades requeridas por la síntesis celular. Las bacterias se reproducen por fisión binaria, de manera sexual o por gemación. En general lo hacen por fisión binaria; la célula original se convierte en dos organismos nuevos. El tiempo requerido para cada división, conocido como tiempo de generación, puede variar desde menos de 20 minutos (bacterias aerobias) hasta varios días (microorganismos anaerobios).

#### 2.6.2.3 Remoción de nutrientes.

Dado que tanto el nitrógeno como el fósforo pueden causar impacto en la calidad del agua que los recibe, la descarga de uno o ambos constituyentes debe ser controlada con frecuencia. El nitrógeno puede estar presente en las aguas residuales de varias maneras, la mayoría del nitrógeno disponible, se presenta en forma orgánica o de amoníaco. Los microorganismos presentes en el proceso de tratamiento asimilan el nitrógeno amoniacal y lo incorporan a su masa celular. En la nitrificación-desnitrificación, la remoción de nitrógeno se logra con un proceso de conversión en dos pasos. El primero paso, el amoníaco se oxida biológicamente a nitratos. En el segundo paso, el nitrato se reduce a nitrógeno gaseoso, el cual se deja escapar del sistema.

El fósforo se encuentra en las aguas residuales en forma orgánica (fósforo enlazado a compuestos orgánicos), como ortofosfato inorgánico (p. ej.,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{HPO}_4^{-2}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y complejos  $\text{HPO}_4^{-2}$ ) o fosfatos complejos (p. ej.,  $\text{P}_2\text{O}_7^{-4}$ ,  $\text{HP}_2\text{O}_7^{-3}$ ,  $\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7^{-2}$ ,  $\text{H}_3\text{P}_2\text{O}_7^{-}$  y complejos de  $\text{HP}_2\text{O}_7^{-3}$ ,  $\text{P}_3\text{O}_{10}^{-5}$ , entre otros). Tanto los ortofosfatos, como los fosfatos complejos provienen de los detergentes y jabones utilizados para la limpieza, siendo los compuestos que más aportan este elemento

a las aguas residuales municipales. En la práctica, la remoción biológica de fósforo se logra al secuenciar los procesos anaerobios y aerobios y producir las condiciones ambientales apropiadas dentro de los reactores.

#### 2.6.2.4 Procesos anaerobios.

Se define como el proceso donde no se encuentra presente el oxígeno, ni el nitrógeno en forma oxidada (nitratos o nitritos). Estos procesos son llevados a cabo por un gran y variado grupo de microorganismos, los cuales normalmente viven en una relación simbiótica. Las condiciones de energía son complicadas debido al escaso rendimiento energético de las reacciones bioquímicas en ausencia de oxígeno como aceptor de electrones.

El tratamiento anaerobio se efectúa en tres etapas. En la primera etapa los componentes complejos de desecho, incluyendo grasas, proteínas y polisacáridos, se hidrolizan en sus componentes más sencillos. Esto lo lleva a cabo un grupo heterogéneo de bacterias facultativas y anaerobias que someten los productos de la hidrólisis (triglicéridos, ácidos grasos, aminoácidos y azúcares) a una fermentación y a otros procesos metabólicos que inducen la formación de compuestos orgánicos simples e hidrógeno, esto mediante un proceso llamado acidogénesis. Los compuestos orgánicos son principalmente ácidos y alcoholes de cadena corta (volátiles). En las dos primeras etapas ocurre poca estabilización de la DQO y DBO. En la tercera etapa los productos finales de la segunda etapa se convierten en gases (principalmente  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) por medio de varias especies de microorganismos anaerobios. A esta etapa se le llama fermentación del metano (Mackenzie *et al.*, 2005).

Las bacterias responsables de la fermentación ácida son relativamente tolerantes a los cambios de pH y temperatura, y tienen una velocidad de crecimiento mucho mayor que la de los microorganismos (arqueas) responsables de la fermentación del metano. En la figura 2.2 se muestra de forma simplificada de la degradación anaerobia.

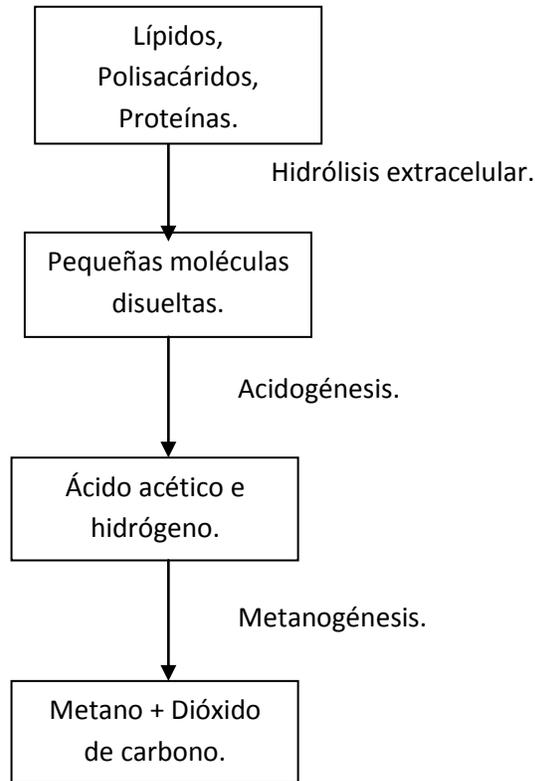
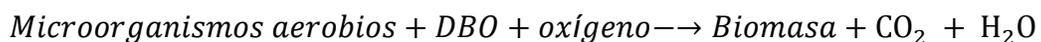


Figura 2.2 Degradación anaerobia en tres pasos de forma simplificada (Henze *et al.*, 2002).

#### 2.6.2.5 Procesos aerobios.

En los procesos aerobios (en presencia de oxígeno) las bacterias heterótrofas (aquellas bacterias que obtienen carbono y energía de compuestos orgánicos) oxidan alrededor de un tercio de la materia orgánica coloidal y disuelta a productos finales estables ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) y transforman los dos tercios restantes en nuevas células microbianas susceptibles a eliminarse de las aguas residuales por sedimentación (Henry *et al.*, 1999).

La materia biodegradable coloidal, soluble y suspendida contribuye a la DBO que será metabolizada de acuerdo a la reacción general siguiente:



Durante el proceso, el material biodegradado es convertido en  $\text{CO}_2$  (mineralización) y una parte se convierte en biomasa. Un problema asociado con el tratamiento aerobio es la eliminación de la biomasa producida durante la

degradación de los contaminantes. Aproximadamente, dos terceras partes del carbono biodegradado es transformado en nuevas células, el restante es convertido en CO<sub>2</sub>, los valores específicos dependen del proceso. Aunque la eficiencia del sistema recae en la producción de células nuevas activas, esto produce una nueva forma de contaminación, el exceso de biomasa de desecho.

#### 2.6.2.6 Selección de procesos aerobios y anaerobios.

Para seleccionar el tratamiento adecuado es necesario aplicar varios criterios aplicables en el tratamiento de aguas residuales, tanto para los procesos aerobios como los procesos anaerobios. En la tabla 2.3 se muestran las diferencias entre los procesos aerobios y anaerobios.

Tabla 2.3 Lista de criterios aplicables para el tratamiento de agua residual (Marchaim, 1992.).

| Criterio                               | Aerobio | Anaerobio |
|--|---------|-----------|
| Rango de agua que puede ser tratada    | +       |           |
| Estabilidad del proceso y control      | +       |           |
| Tasas aplicables a cargas volumétricas |         | +         |
| Potencia de entrada                    |         | +         |
| Calor de entrada                       | +       |           |
| Exceso de producción de lodos          |         | +         |
| Requerimientos excluyendo nutrientes   |         | +         |
| Requerimientos excluyendo oxígeno      |         | +         |
| Remoción de DBO                        | +       |           |
| Remoción de N                          | +       |           |
| Remoción de P                          | +       |           |
| Producción de subproductos             |         | +         |

+ Indica que es un criterio aplicable para ese proceso.

Para decidir qué sistema de tratamiento se va a implementar en el agua residual a tratar, se deben considerar varios aspectos.

- El tratamiento anaerobio no lleva a estándares bajos de contaminantes de DQO, DBO<sub>5</sub> o COT que puedan cumplirse con los sistemas aerobios y que son necesarios por leyes ambientales.
- El agua residual altamente concentrada debe tratarse anaeróbicamente, pues existe la posibilidad de recuperar energía mediante biogás. En cambio para el tratamiento aerobio se necesita un gran suministro de aire y genera bastante lodo residual.
- Las aguas residuales con bajos contaminantes orgánicos deben ser tratadas de forma aerobia dada su alta estabilidad a concentraciones bajas de contaminantes.
- Los sistemas con tratamiento anaerobio son más caros de construir pero más baratos de operar que los tratamientos aerobios (Jördening y Winter, 2005).

Tabla 2.4 comparación entre procesos aerobios y anaerobios (Waites *et al.*, 2005).

| Aerobio  | Anaerobio   |
|--|---|
| • <b>Aproximadamente 50% del carbono biodegradado es convertido en células nuevas.</b> | • Del 5 al 10% del carbono biodegradado es convertido en células nuevas.            |
| • <b>Aproximadamente 50% del carbono biodegradado es convertido en CO<sub>2</sub>.</b> | • Del 90 a 95% del carbono biodegradado es convertido en metano y CO <sub>2</sub> . |
| • <b>Crecimiento rápido.</b>   | • Crecimiento lento.  |
| • <b>No hay producción de energía.</b>   | • Energía producida en forma de metano.   |

En la tabla 2.4 se muestra la comparación de los procesos aerobios y anaerobios. Aunque existan diferencias entre los procesos, en tiempos recientes se acepta que ambos tipos de procesos no se oponen, al contrario, se complementan al aportar cada uno su parte, mejorando así la calidad de los efluentes que se tratan.

Los procesos biológicos más usados son el proceso de lodos activados, lagunas aireadas, filtros percoladores, biodiscos y lagunas de estabilización.

#### *2.6.2.7 Lodos activados.*

El Proceso de lodo activado es una técnica de tratamiento biológico de aguas residuales en la que se agita y airea una mezcla de aguas residuales y lodo biológico. A continuación los sólidos biológicos se separan del agua residual tratada y se regresan al proceso de aireación, descartando una fracción de ellos (lodos de purga).

El proceso de lodo activado adquiere su nombre de la masa biológica que se forma cuando se inyecta aire en forma continua en el agua residual. En este proceso los microorganismos se mezclan por completo con la materia orgánica en el agua en condiciones que simulan su crecimiento cuando usan la materia orgánica como alimento. A medida que los microorganismos crecen y se mezclan por la agitación del aire se agrupan entre sí (floculan) y forman una masa activa de microbios, llamada lodos activados.

El agua residual entra en forma continua en un tanque de aireación, donde se inyecta aire que mezcla el lodo activado en el agua residual y que suministra el oxígeno necesario para que los organismos descompongan la materia orgánica. A la mezcla de lodo activado y agua residual en el tanque de aireación se le llama "licor mixto o mezclado". El licor mezclado pasa del tanque de aireación a un clarificador secundario, donde el lodo activado se sedimenta y separa. La mayor parte del lodo asentado se regresa al tanque de aireación para mantener alta la población de microorganismos que permita una descomposición rápida de la materia orgánica.

En los sistemas convencionales de lodo activado, el agua residual es aireado durante 6 a 8 horas en estanques de aireación largos y rectangulares. Se suministran alrededor de 8 m<sup>3</sup> de aire por cada metro cúbico de agua residual tratada. Se suministra el aire suficiente que mantenga el lodo en suspensión y que proporcione el oxígeno necesario para los microorganismos. Se inyecta cerca del

fondo del tanque de aireación mediante un sistema de tubos perforados o difusores, o bien mediante aireadores mecánicos. El volumen de lodo que regresa al tanque de aireación suele ser del 20 a 30% del flujo de agua residual.

El procesamiento de lodo activado se controla desechando una parte de los microorganismos cada día para mantener la cantidad apropiada que degrada en forma eficiente la  $DBO_5$ . Los microorganismos desechados se llaman lodo activado de desecho (LAD) o lodo de purga. Así se alcanza un balance entre el crecimiento de organismos nuevos y su eliminación por desecho. Si se desecha demasiado lodo, la concentración de microorganismos en el licor mezclado será demasiado baja para que el tratamiento sea efectivo; si se desecha muy poco se acumulará una gran concentración de microorganismos y al final se derramarán por el tanque secundario e irán a la corriente receptora.

El tiempo de retención celular  $\theta_c$ , se define como el tiempo promedio que duran los microorganismos en el sistema. Es distinto del tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ), es decir el tiempo promedio que dura el agua residual en el tanque.

## **2.7 Normatividad en reuso de aguas residuales.**

Para el reúso de las aguas residuales ha sido necesario implementar normas para regular y así asegurar la calidad del agua para prevenir la contaminación de ríos, océanos, lagos, así como la proliferación de enfermedades que pudieran afectar al hombre.

Los estatutos o normas, van a variar de acuerdo al país o incluso a la región, también van a depender el uso del agua, para riego, reúso en parques públicos o para reúso en sanitarios. En la tabla 2.5 se muestran normas para el reúso de agua en diferentes países.

Tabla 2.5 Lista de guías y/o regulaciones para el reúso de agua (Chaillou *et al.*, 2010).

| País             | Tipo de reuso                                      | Parámetros fisicoquímicos  | Criterios Microbiológicos (NMP/100mL)  | Referencia                         |
|------------------|--|--|--|------------------------------------|
| <b>Australia</b> | Riego, Reúso a sanitarios, lavado de autos.        | SST<30mg/L<br>DBO <sub>5</sub> <20mgO <sub>2</sub> /L  | Coliformes totales <10   | Australian capital territory, 2004 |
| <b>Canadá</b>    | Recuperación de agua en hogares                    | SST<10mg/L<br>Turbidez <2NTU<br>DBO <sub>5</sub> <10mgO <sub>2</sub> /L<br>Cl <sub>2</sub> residual >0.5mg/L   | Coliformes totales. No detectado<br><i>E. coli.</i> No detectado                               | Canadian guidelines, 2007          |
| <b>Alemania</b>  | Reúso a sanitarios                                 | SST: Casi libre<br>Turbidez: Libre<br>DBO <sub>7</sub> <5mgO <sub>2</sub> /L   | Coliformes totales <100/mL<br>Coliformes fecales <10/mL<br><i>Pseudomonas aeruginosa</i> <1/mL | Nolde, 1999                        |
| <b>Israel</b>    | Regulación para el tratamiento de aguas residuales | SST<10mg/L<br>DBO <sub>5</sub> <10mgO <sub>2</sub> /L<br>DQO<100mgO <sub>2</sub> /L  | --   | Ramon et al., 2004                 |
| <b>Italia</b>    | Riego, uso urbano                                  | pH 6-9.5<br>SST<10mg/L<br>DBO <sub>5</sub> <20mgO <sub>2</sub> /L<br>DQO<100mgO <sub>2</sub> /L<br>N total<15mg <sub>N</sub> /L<br>P total<2mg <sub>P</sub> /L | <i>E. coli.</i> <10<br><i>Salmonella.</i> No detectada   | Decreto 2 maggio, 2006             |
| <b>España</b>    | Uso urbano residencial                             | SST<10mg/L<br>Turbidez<2 NTU   | <i>E. coli.</i> <10<br>Helminto 1huevo/10 L  | Real decreto 1620, 2007            |
| <b>E.U.A.</b>    | Uso urbano   | pH 6-9<br>Turbidez <2 NTU<br>Cl <sub>2</sub> residual >1 ppm<br>DBO <sub>5</sub> <10mgO <sub>2</sub> /L  | Coliformes fecales. No detectado   | US EPA, 2004                       |

En México, la norma NOM 003-SEMARNAT-1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas tratadas de reúso en espacios públicos. Esta norma está dirigida al reúso en actividades donde el público este expuesto directamente o en contacto indirecto u ocasional con el agua tratada. La norma oficial mexicana considera los siguientes usos: llenado de lagos con paseos en lancha, remo y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines. En la tabla 2.6 se muestran los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas tratadas.

Tabla 2.6 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM 003-SEMARNAT-1997)\*.

| Tipo de reúso   | Coliformes fecales<br>NMP/100 ml | Huevos de helminto (h/l) | Grasas y aceites mg/l | DBO <sub>5</sub> mgO <sub>2</sub> /l | SST mg/l |
|---|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------|
| <b>Servicios al público con contacto directo.</b>               | 240                              | ≤1                       | 15                    | 20                                   | 20       |
| <b>Servicios al público con contacto indirecto u ocasional.</b> | 1000                             | ≤5                       | 15                    | 30                                   | 30       |

\*Los límites máximos permisibles son promedios mensuales.

Aunque esta norma oficial mexicana no considera el reúso a los sanitarios, es un buen parámetro de comparación para establecer la calidad del agua con parámetros reales.

Otras normas oficiales mexicanas para la contaminación en el agua es la NOM 001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes

nacionales, mientras que la NOM 002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

## **2.8 Planta de tratamiento de agua residual del edificio 12 y 18 del instituto de ingeniería de la UNAM. Un poco de historia.**

Este proyecto tuvo sus inicios en el año de 2007 con el propósito de llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales descargadas de los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería. En un inicio, se instalaron dos plantas paquete con tecnología aerobia de lodos activados bajo el concepto de aireación extendida. Estas plantas fueron operadas durante un año sin conseguir alcanzar valores dentro de la Norma 003. A principios del año 2009, se instaló una tecnología de patente UNAM conocida como microplanta, proceso biológico bajo el concepto conocido como triple A (en donde se combinan los procesos anaerobios, aerobios y anóxicos) esta planta fue diseñada por investigadores del mismo Instituto, cuyo propósito fue probarla con este tipo de aguas residuales y por ende repartir la carga orgánica en las tres plantas. Con la adición de esta planta, se logró alcanzar niveles de calidad cercanos a la NOM-003- SEMARNAT-1997, para parámetros tales como  $\text{DBO}_5$ , y sólidos suspendidos totales. En el mismo 2009 se instalaron dos filtros de arena sílice y carbón activado, con objeto de filtrar el efluente proveniente de las tres plantas de tratamiento biológicas (Gómez, 2009).

A inicios del 2010 se incorporaron dos equipos de desinfección a la PTAR (bomba dosificadora de hipoclorito de sodio y luz UV). Durante el segundo semestre del 2010 se alcanzaron valores por debajo de la NOM-003-SEMARNAT-1997; con estos resultados se tomó la decisión de iniciar la recirculación del efluente tratado hacia los edificios 12 y 18 a finales del 2010. Previo a esto, se realizó una campaña de difusión para dar a conocer a la comunidad del Instituto y principalmente a los usuarios de los edificios 12 y 18 el sistema de tratamiento y reúso, mediante la exposición de carteles, trípticos, visitas a la PTAR y conferencias.

### 3. Metodología.

En este capítulo se presenta una descripción del tren de tratamiento que integra la planta de tratamiento de aguas residuales de los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería, detallando las diferentes etapas y los equipos involucrados en la operación. Posteriormente, se mencionan las técnicas experimentales empleadas para determinar los parámetros fisicoquímicos y biológicos importantes para el monitoreo y control del proceso. Finalmente, se toca el tema del arreglo de las tuberías en los edificios 12 y 18 para la separación de las corrientes de agua potable y del agua tratada, así como el control del agua tratada recirculada en los sanitarios y mingitorios.

#### 3.1 Descripción del tren de tratamiento.

El proceso inicia con la descarga de agua negra proveniente de los sanitarios de los edificios 12 y 18 hacia un cárcamo de bombeo; posteriormente, con ayuda de unas bombas sumergibles ubicadas en el interior del cárcamo, se bombea el agua negra hacia un tanque séptico, donde los sólidos de mayor volumen sedimentan en el fondo del tanque, separándose del agua. Estos sólidos se transforman en material soluble y biogás (formado principalmente por  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , etc.), el cual mediante un soplador es captado haciéndolo pasar por un biofiltro que cuenta con una cama de composta para su degradación y posteriormente liberarse hacia la atmósfera. El sobrenadante es bombeado mediante unas bombas sumergibles hacia el tratamiento biológico.

El caudal enviado por las bombas es repartido equitativamente a tres plantas de tratamiento paquete de tipo biológico, dos ellas de lodos activados en su modalidad de aireación extendida y una planta de procesos combinados (Anóxica, Anaerobia y Aerobia) o microplanta. Posteriormente, el efluente de cada una de las plantas se mezcla y pasa por un punto donde se dosifica con una solución de hipoclorito de sodio. Una vez desinfectada el agua tratada, es almacenada en un

tanque para después mediante una bomba dirigirla hacia unos filtros multimedia de arena sílice, seguido de un filtro de carbón activado. El agua filtrada se pasa por una segunda desinfección con luz ultravioleta y por último, el agua es almacenada en un segundo tanque en donde se bombea hacia los sanitarios con ayuda de un sistema de bombeo y un hidroneumático para tener la presión necesaria y hacer llegar el agua hasta el último piso del edificio 12. En la línea de tubería de agua tratada que va a los sanitarios, se dosifica un colorante artificial de la marca Deiman, que contiene una concentración de 27.5% de colorante alta plus 270, mientras que el resto es un excipiente de NaCl. El colorante se utiliza para identificar visualmente que se trata de agua tratada. En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo de tratamiento de la planta.

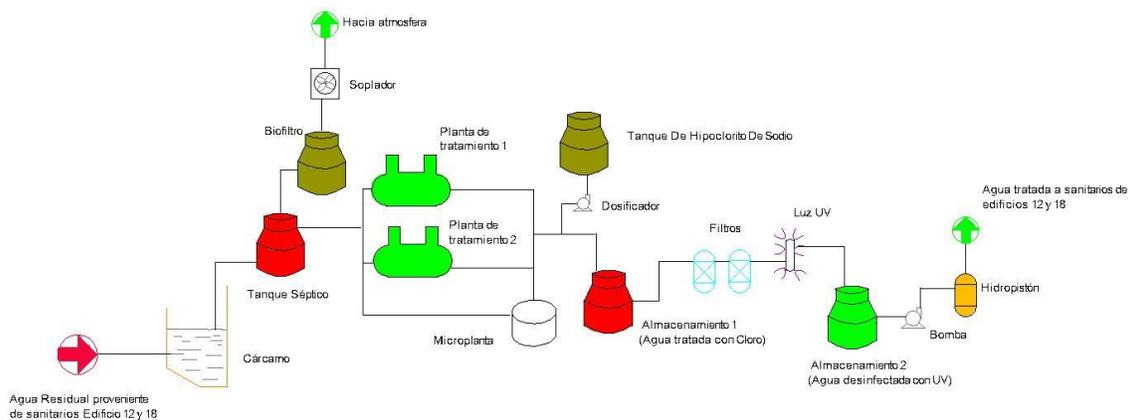


Figura 3.1 Diagrama de Flujo de Proceso de la PTAR.

## 3.2. Descripción de las operaciones unitarias.

Para conocer con más detalle el tren de tratamiento, se presentan a continuación las operaciones y procesos unitarios presentes en la PTAR, los equipos electromecánicos y de control.

### 3.2.1 Cárcamo de bombeo.

En esta operación unitaria, se recibe el agua proveniente de 15 sanitarios, 7 mingitorios y 21 lavamanos de los edificios 12 y 18. El agua es bombeada mediante unas bombas sumergibles trituradoras (0.5 hp) hacia la siguiente operación unitaria. El funcionamiento de las bombas es controlado por interruptores de nivel (peras), los cuales están calibrados a diferentes alturas. La capacidad del cárcamo es aproximadamente de  $5\text{m}^3$ . En la figura 3.2 se muestra el cárcamo de bombeo de la PTAR.



Figura 3.2 Cárcamo de bombeo de la PTAR.

### 3.2.2 Tanque séptico.

El tanque está construido de polietileno de alta densidad y tiene una capacidad máxima de  $5\text{m}^3$  (Rotoplas, modelo Expel) en él se retiene la mayor parte de los sólidos sedimentables del agua residual provenientes del cárcamo de bombeo

donde se regula el caudal de agua que ingresa a las tres plantas de tratamiento de agua (figura 3.2). El caudal está regulado por dos pequeñas bombas sumergibles de la marca F&Q modelo FQ 508F, cuya operación está controlada mediante temporizadores y operan de la siguiente manera: una bomba se emplea para recirculación con el fin de limpiar el impulsor de la bomba que alimenta a la PTAR, esta bomba opera una hora, la otra es utilizada para alimentación de las plantas biológicas con un tiempo de operación de tres horas. Ambas, están contenidas en un recipiente plástico y protegidas por una malla de mosquitero que evita su rápido taponamiento con los sólidos flotantes (figura 3.4a y b).



Figura 3.3 Tanque Séptico y biofiltro (en segundo plano) de la PTAR.

En la parte superior del tanque se instaló una línea de tubería de extracción de aire, en PVC de 3" de diámetro, que conduce los gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , principalmente) generados como producto de la descomposición de materia orgánica sedimentada en el tanque séptico para que sean tratados en un biofiltro. El tratamiento de estos gases se consigue al hacerlos pasar a través de una cama de composta contenida en el biofiltro, y con ayuda de un soplador para después liberarse a la atmósfera. En la figura 3.3 se muestra el tanque séptico y el biofiltro instalados en la PTAR.



(a)

(b)

Figura 3.4 a) Bombas de alimentación en su recipiente tamiz, b) Tablero de control con los temporizadores

### 3.2.3 Plantas biológicas.

Como se mencionó anteriormente, el tren de tratamiento posee tres plantas biológicas, dos de lodos activados en su modalidad de aireación extendida y otra planta de procesos combinados (anaerobio, aerobio y anóxico) conocida como microplanta. Con esta configuración se trata un caudal de  $3\text{m}^3$  por día.

#### 3.2.3.1 Plantas paquete con aireación extendida (Planta 1 y Planta 2).

Estas plantas son consideradas plantas paquete por su tamaño compacto y en un solo tanque. Cuentan con un volumen útil de  $2.5\text{m}^3$ , integrado por tres cámaras principales en las cuales se dan las siguientes operaciones unitarias (figura 3.5).



Figura 3.5 Detalle de una planta paquete.

- Tratamiento Primario.

Consiste de la remoción de la materia sedimentable a través de medios físicos, reduciendo más del 30% de los sólidos suspendidos antes de entrar al tanque de aireación.

- Proceso de Aireación (lodos activados en su modalidad de aireación extendida).

El agua residual proveniente del tratamiento primario se mezcla y es aireada a través de difusores de aire localizados en el fondo del tanque. Estos difusores inyectan aire suficiente para satisfacer la demanda de oxígeno de los microorganismos presentes en el lodo activado y así puedan degradar la materia orgánica presente en el agua. Una vez tratada el agua, sale del tanque de aireación para pasar a la sección de sedimentación y clarificación. El aire es suministrado por un compresor de 1 hp de potencia, localizado en la parte superior de la planta.

- Proceso de sedimentación y clarificación.

En esta etapa el líquido no es agitado, permitiendo que las partículas sólidas (biomasa) sedimenten al fondo de la cámara. El sobrenadante constituye el efluente de la planta.

Para las plantas paquete su purga es sencilla. Debido a que estas plantas tienen una válvula en el sedimentador secundario que permite la purga del lodo acumulado en esta zona. Estas purgas se realizan por lo menos una vez cada dos semanas esto evita una mayor turbidez en el efluente de las plantas. Por cada planta paquete se retiran 20 litros de lodo. En la figura 3.6 se muestra la válvula utilizada para purgar las plantas paquete.



Figura 3.6 Detalle de válvula de purga.

### 3.2.3.2 *Microplanta.*

Es una planta paquete para el tratamiento de aguas residuales, diseñada en el instituto de ingeniería de la UNAM, cuenta con patentes en México (MX 988985), Estados Unidos de América (US 6210578). Esta planta fue diseñada para tener un costo de operación y mantenimiento bajo. Es un tanque de volumen total de 1016 L con una capacidad de tratamiento de 1 m<sup>3</sup> al día. Este sistema se encuentra dividido por nueve zonas, que se describen a continuación. En la figura 3.6 se

muestra la vista exterior de la microplanta y en la figura 3.7 la parte interna donde se muestra cada una de las zonas en las cuales se encuentra dividido el sistema.



Figura 3.7 Vista exterior de la microplanta.

- Zona anaerobia (1).

El agua residual proveniente del tanque séptico entra a la microplanta a través del tubo central y pasa de forma ascendente a la sección anaerobia. En esta zona se tienen en el fondo lodos anaerobios, los cuales son los encargados de degradar la materia orgánica del agua residual y como producto de esta reducción se genera un subproducto de valor energético como es el biogás cuya composición es principalmente de metano.

- Zona anóxica (2 y 3).
- En esta sección, se lleva a cabo la remoción de la materia orgánica y de nitrógeno por medio de la desnitrificación. Estas zonas tienen un medio de soporte de empaques de plástico con el fin de que sobre él se desarrollen bacterias anóxicas y así se tenga una mayor superficie de contacto entre la biopelícula y el agua residual. Los nitratos provienen de la zona de sedimentación (8 y 9) y se conducen por medio de una tubería de recirculación accionada con aire “airlift” (10). Zona aerobia (4, 5, 6, 7).

Para la zona aerobia se le suministra aire proveniente de un compresor. Esta sección también contiene empaques de plástico donde se le adhiere una biopelícula, para que las bacterias aerobias tengan mayor superficie de contacto, se incrementa la cantidad de biomasa activa y así se mejore la degradación de la materia orgánica.

- Zona de sedimentación y clarificación (8 y 9).

En esta zona se sedimentan los sólidos generados en las etapas anteriores, de donde se recirculan hacia la zona anaerobia para su tratamiento mediante un sistema airlift. Finalmente, el agua pasa a la sección de clarificación, de donde el agua sale clarificada y con contenido mínimo de sólidos suspendidos.

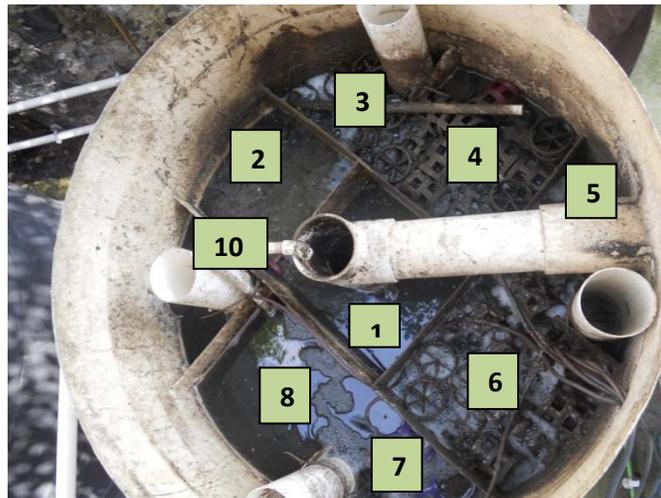


Figura 3.8 Vista superior de la microplanta

En la figura 3.8 se muestran cuatro tubos de PVC de 4" de diámetro, que se emplean para purgar los lodos generados en cada zona.

Los lodos que provienen de otras zonas de la microplanta se acumulan en el sedimentador secundario (8) de la microplanta. Mucho de este lodo no se puede recircular con ayuda del airlift, es por eso que es necesario purgar esta zona de la microplanta. Para retirar los lodos se ocupa una bomba sumergible de 0.5 hp. Generalmente, se retiran los lodos una vez cada dos semanas, ya que no existe una acumulación suficiente en una semana, salvo en ocasiones cuando está

entrando mucha materia orgánica o si existe algún problema con el “airlift” o con el compresor. En cada purga se retiran de 15 a 20 litros de lodo concentrado.

### 3.2.4 Desinfección con cloro.

La desinfección del efluente se realiza en un punto donde se mezclan las corrientes de las tres plantas, utilizando una solución con concentración de hipoclorito de sodio de 140mg/L, el cual se prepara en un tanque de polietileno de alta densidad de 450 L de volumen, diluyéndolo de su máxima concentración comercial del 13% con agua.

Para adicionar la solución de hipoclorito de sodio se emplea una bomba dosificadora de la marca Hanna Blackstone modelo BL-1.5, de caudal ajustable de 1,5 L/h a una presión de 13 bares. Esta bomba es de diafragma de desplazamiento positivo, es accionada por un circuito electromagnético de estado sólido. El mando de control externo permite seleccionar un régimen de dosificación preciso y constante. En la figura 3.9 se muestra la bomba dosificadora de hipoclorito de sodio.



Figura 3.9 Bomba de diafragma utilizada para la dosificación de hipoclorito de sodio.

El agua desinfectada con cloro se almacena en un tanque de polietileno de alta densidad de 5m<sup>3</sup> de volumen.

El agua que llega a sanitarios debe de tener entre 1 a 1.5 mg/L de cloro residual. Para que esto sea posible es necesario mantener el cloro residual por arriba de 2.5 mg/L en el segundo tanque de almacenamiento, debido a que en la línea de tubería se pierde cloro residual. Para el monitoreo del cloro residual es necesario ocupar pastillas DPD 1, que mediante colorimetría indica la cantidad de cloro residual presente en el agua. Las muestras se toman directamente de los sanitarios, así como del segundo tanque de almacenamiento durante toda la semana.

### 3.2.5 Filtros.

El agua tratada y desinfectada con cloro, contiene sólidos suspendidos que no se pudieron remover en los procesos anteriores, por eso es necesario de un sistema de filtración. En la planta se tiene un arreglo de dos sistemas de filtración, uno con arena sílice y otro con carbón activado (figura 3.10).



Figura 3.10 Detalle del equipo de filtración.

- Filtro de arena sílice.

El proceso de filtración con arena sílice se ocupa principalmente para la remoción de sólidos suspendidos en el agua tratada. La arena sílice es también conocido como  $\text{SiO}_2$ , sirve principalmente para la fabricación de vidrio.

La arena sílice se encuentra empacada en una columna de filtrado con presión marca Econominder modelo 5600.

- Filtro de carbón activado.

Este proceso se emplea para la decoloración del agua, la remoción de olores y el pulimento de las aguas residuales tratadas.

El carbón está empacado en una columna de filtrado con presión. Contiene diferentes secciones en la columna, que va de carbono granular al carbón en forma de polvo. El carbón activado también se encuentra empacado en una columna de filtrado con presión de la marca Econominder modelo 5600.

La operación de los filtros se realizó diariamente, se encendían de forma manual y se dejan operando hasta que el segundo tanque de almacenamiento se encuentre en su máxima capacidad; este procedimiento se realiza por las mañanas para evitar la ausencia de agua en los edificios.

Los filtros se someten a retrolavado para darles limpieza y que mantengan su eficiencia, evitando la saturación de sólidos en los filtros. Es necesario realizar el retrolavado continuamente, es una forma eficiente de limpiar los filtros de sólidos acumulados.

La limpieza de los filtros es muy importante para que mantengan su eficiencia. Para evitar la saturación de sólidos suspendidos en los filtros es necesario realizar un retrolavado. En la filtración, el agua entra a los filtros con una presión de  $3\text{kg}/\text{cm}^2$  en flujo descendente. Durante el recorrido por los filtros, se quedan acumulados los sólidos suspendidos entre los poros de la arena sílice y del carbón activado. En el retrolavado, se hace un cambio de la dirección del flujo mediante válvulas y se cambia la perilla a opción de "back wash" (durante la filtración, la

perilla se encuentra en la opción “in service”). Este cambio va a provocar que el agua entre a los filtros con una presión de  $5\text{kg/cm}^2$  y que cambie la dirección del flujo y en vez de ser flujo descendente será ascendente. Este procedimiento termina cuando en la perilla ya no se aprecia la opción “back wash”. Una vez terminado el procedimiento, se vuelve a cambiar la dirección del flujo con ayuda de las válvulas.

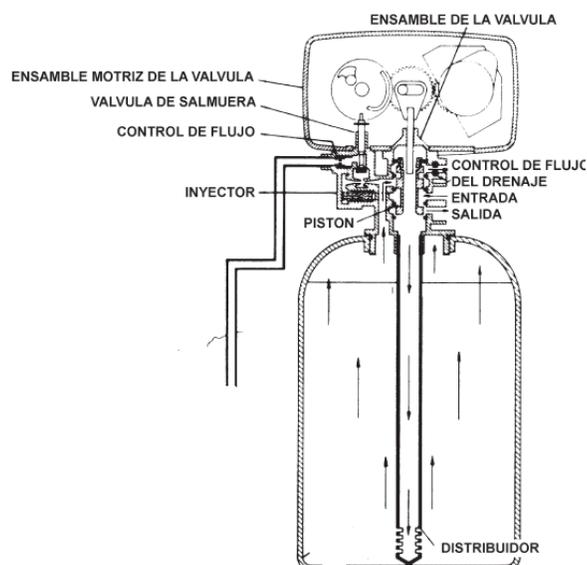


Figura 3.11 Diagrama interno del filtro.

Este procedimiento se realizó los viernes de cada semana, pero, cuando las plantas biológicas producían un exceso de lodo, el retrolavado se realizaba de dos a tres veces por semana para evitar la sobresaturación de los filtros. En la figura 3.11 se muestra un diagrama de los filtros utilizados en la PTAR en la modalidad de backwash.

### 3.2.6 Luz UV.

La luz ultravioleta es parte del espectro electromagnético de radiación, la cual también es emitida por el sol. Está situada entre las bandas de rayos X y la luz visible, con longitudes de onda que van desde 180 hasta 400 nanómetros (nm). Para el tratamiento de agua, la longitud de onda utilizada es de 260 nm, con esta

longitud de onda se asegura la muerte de cualquier patógeno siempre y cuando se tenga una longitud de onda entre 220 y 300 nm, en este intervalo las ondas UV tienen la suficiente energía para causar roturas en el DNA, produciendo la muerte del organismo expuesto que aún pueda estar presente en el agua (Brock, 2006).

En la planta de tratamiento está instalada una lámpara de luz ultravioleta de la marca Trojan UV MAX modelo F4, que emite una radiación de 30 mJ/cm<sup>2</sup> y que se encuentra después de la filtración. Con este equipo se realiza una segunda desinfección, para remover los patógenos que pudieran tener un recrecimiento en el interior de los filtros. La lámpara UV se controla manualmente, antes de iniciar el proceso de filtración, es necesario encender la lámpara UV, para que alcance la longitud de onda deseada, este proceso tarda aproximadamente 2 minutos, una vez que alcanza su potencia máxima (el tablero de la lámpara lo indica) ya se puede encender la filtración, una vez que se termina de filtrar el apagado es manual. En la figura 3.12 se muestra el tipo de lámpara UV utilizado en la PTAR.



Figura 3.12 Lámpara UV utilizada en la PTAR.

Después de pasar el agua por la lámpara de UV, se almacena en un tanque de polietileno de alta densidad de 5m<sup>3</sup> de volumen para su posterior envío a sanitarios y mingitorios de los edificios 12 y 18. Para ello se emplean unas bombas centrífugas de 3 hp y un tanque hidroneumático (figura 3.13). Estas bombas operan de acuerdo a un controlador de nivel ubicado en el segundo tanque de almacenamiento: si el nivel se encuentra muy bajo, no hay suministro de agua. En este caso, el agua no se puede suministrar de forma continua, por lo que las

bombas se regulan debido a la presión contenida en un hidroneumático. Cuando baja la presión del hidroneumático a  $3 \text{ kg/cm}^2$  las bombas se encienden para alcanzar la presión de  $4.5 \text{ kg/cm}^2$ , presión suficiente para que el agua llegue al cuarto piso del edificio 12.



Figura 3.13 Bomba centrífuga e hidroneumático.

### 3.2.7 Recirculación de agua tratada hacia los edificios 12 y 18.

Para llevar a cabo la recirculación de agua tratada a los sanitarios se realizó la instalación de una línea de tubería independiente de agua tratada en los sanitarios y mingitorios con el propósito de separar el agua tratada del agua potable. Esta adecuación requirió además la colocación de un arreglo de válvulas como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3.14 Bomba dosificadora (izquierda) y detector de flujo (derecha).

En la línea de tubería de agua tratada, justo después del hidroneumático, se instaló un detector de flujo (ver Anexo IV) para accionar el arranque de una bomba dosificadora de la marca Hanna Blackstone modelo BL-1.5 (figura 3.14), para la inyección de un colorante artificial azul, el cual como se comentó anteriormente, es un colorante del tipo alta plus 270 con 27.5% en peso de colorante, mientras que el 72.5% restante es un exipiente de NaCl. Se colorea el agua tratada, mejorar el aspecto y que los usuarios la distinguan del agua potable.



Figura 3.15 Arreglo de tubería en el interior del edificio.

En la figura 3.16 se muestra el tren de tratamiento completo de la PTAR.



Figura 3.16 Vista aérea de la PTAR.

### 3.3 Parámetros fisicoquímicos y biológicos.

Para comprobar el funcionamiento de las plantas es necesario determinar algunos parámetros establecidos por métodos normalizados (Standard Methods, 1998). El pH, la temperatura, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ), turbidez, conductividad, sólidos totales, sólidos suspendidos (totales, volátiles y fijos), el oxígeno disuelto y los coliformes fecales, fueron los parámetros medidos durante el estudio.

Algunos de estos parámetros no son mencionados en las normas oficiales mexicanas, pero para tener un análisis más completo sobre la calidad del agua es necesario realizarlos. En planta de tratamiento se establecieron seis puntos de muestreo y a cada uno se le realizaron las pruebas antes mencionadas, salvo los coliformes fecales y la  $DBO_5$  que solo se realizaron en el último punto de muestreo, debido a que en ese punto se localiza el efluente final que va a los

sanitarios y es en dónde se debe de tener un mayor control de calidad. En la tabla 3.1, se describe localización de los seis puntos de muestreo, las pruebas realizadas y la frecuencia.

Tabla 3.1 Frecuencia y puntos de muestreo de los parámetros fisicoquímicos.

| Parámetro                 | Influyente | Planta<br>1 | Planta<br>2 | Microplanta | Efluente* | Filtrado | Frecuencia |
|---------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|----------|------------|
| pH                        | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-V        |
| Temperatura               | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-V        |
| O.D.                      |            | X           | X           | X           |           |          | L-V        |
| DQO <sub>t,s</sub>        | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| SST                       | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| SSV                       | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| SDF                       | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| STT                       | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| Turbidez**                | X          | X           | X           | X           | X         | X        | L-M-V      |
| Conductividad<br>**       |            |             |             |             |           | X        | L-M-V      |
| Cloro residual            |            |             |             |             |           | X        | L-V        |
| DBO <sub>5</sub> ***      |            |             |             |             |           | X        | semanal    |
| Coliformes<br>fecales *** |            |             |             |             |           | X        | semanal    |

\*Efluente: mezcla de las descargas de las tres plantas; \*\* La turbidez y la conductividad se midieron a partir del día 333 de operación.\*\*\*La DBO<sub>5</sub> y Coliformes fecales se midieron a partir del día 216 de operación.

### 3.3.1 pH

El pH es muy necesario regularlo en la operación de una planta de tratamiento ya que influye directamente en el crecimiento microbiano de las plantas biológicas. Generalmente, el pH debe estar entre 6.5 a 8.5 para que las bacterias tengan un crecimiento óptimo, otra información que nos proporciona es la acidez o basicidad del agua que está entrando al sistema. Además, este dato nos indica si desde los sanitarios se está desechando algún producto químico que esté provocando el aumento o disminución del pH.

El pH se midió con ayuda de un potenciómetro Oakton 510 en el laboratorio. En algunas ocasiones se medía el pH directamente en el interior de las plantas.

### 3.3.2. Temperatura y oxígeno disuelto.

La temperatura y el oxígeno disuelto se relacionan en la operación de las plantas biológicas: a mayor temperatura, la cantidad de oxígeno disuelto en el agua disminuye, de acuerdo con la ley de Henry.

El oxígeno disuelto es proporcionado por un compresor que alimenta el aire a las plantas biológicas, así que es necesaria su medición para comprobar el correcto flujo de aire hacia las plantas. La medición del oxígeno se hizo mediante la ayuda de un medidor de oxígeno YSI 58.

### 3.3.3 Demanda química de oxígeno (DQO).

Este parámetro es uno de los parámetros más empleados para verificar la calidad del agua residual; es una técnica sencilla de preparar y la ventaja es que el resultado es casi inmediato, a diferencia de la DBO<sub>5</sub>. Su principal objetivo es verificar la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidadas por medios químicos.

Para evaluar la calidad del agua, se realizaron dos tipos de DQO, la DQO total (DQOt) y la DQO soluble (DQOs). La DQO total es toda la materia orgánica presente en cada muestra, es decir, se toma la muestra tal cual del frasco, sin que pase por un proceso previo de filtrado. Para la DQO soluble, se toma la muestra una vez que el agua pasó por una filtración con filtros Whatman GF-A, esto quiere decir que la muestra tomada sólo va a tener sólidos menores a los del tamaño de poro de los filtros, en este caso se ocuparon filtros de 1.6µm.

Durante la experimentación se realizó la prueba de DQO total y soluble siguiendo la técnica de reflujo cerrado por titulación y a mitad del la experimentación se cambio por la técnica de reflujo cerrado por colorimetría ya que se observó que la medición con el espectrofotómetro arrojaba resultados similares, con un porcentaje

de error cercano al 5%, ambas técnicas se encuentran descritas en (Standard Methods, 1998). Para ambas técnicas se utilizó un digestor Hatch DRB 200, mientras que para la técnica de refluo cerrado por colorimetría se utilizó un espectrofotómetro Hatch DR 5000.

### 3.3.4 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro que determina la cantidad de materia susceptible a ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida o en suspensión. Este es uno de los parámetros que marca la NOM 003-SEMARNAT-1997.

El monitoreo de esta técnica se empezó a realizar dos meses antes que se recirculara el agua tratada hacia los sanitarios, este parámetro se mandó realizar en los laboratorios ABC, que se encuentra certificado para la elaboración de análisis de calidad del agua.

### 3.3.5 Sólidos.

Los sólidos también son un parámetro importante; indican la cantidad de materia orgánica e inorgánica presente en el agua, ya sea en forma disuelta o en suspensión.

Existen diferentes tipos de sólidos, cada uno puede dar una información diferente para el tratamiento. En este caso se realizaron los sólidos totales y suspendidos, cada uno en sus tres formas (total, volátil y fija). Los sólidos disueltos se calcularon por diferencia entre los totales y los suspendidos. La determinación de sólidos fue realizada en base a técnica establecida por el Standard Methods.

### 3.3.6 Turbidez.

Es un parámetro que indica la calidad de las aguas residuales tratadas con relación al material residual en suspensión coloidal. La turbidez se relaciona con los sólidos suspendidos totales, ya que evitan el paso de un haz de luz por la muestra.

La turbidez se empezó a medir una vez que se estaba recirculando el agua, para monitorear con que calidad visual llegaba a los sanitarios. Para este parámetro se utilizó un turbidímetro Hatch 2100P.

### 3.3.7 Conductividad.

La conductividad indica la cantidad de material inorgánico (sales) presente en el agua. Este parámetro puede monitorear el grado de acumulación de sales que se alcanza debido a la recirculación del agua. Este parámetro es relevante ya que el exceso de materia inorgánica puede disminuir la eficiencia del proceso y puede alterar otros parámetros, como la DQO y los sólidos.

Se empezó a medir la conductividad cuando se inició la recirculación con ayuda de un conductímetro Hatch.

### 3.3.8 Coliformes fecales.

El agua residual antes de ser tratada contiene gran cantidad de microorganismos patógenos, que provocan daños a la salud, es por eso que en la norma oficial mexicana considera la medición de coliformes fecales presentes en el agua tratada.

Para conocer este parámetro es necesario realizar la prueba del número más probable, es una técnica estadística que cuantifica la densidad de microorganismos en una muestra. Las muestras se recolectan en bolsas estériles con tiosulfato de sodio, esto con el fin de eliminar presencia de iones como

cloruros, que afectan la prueba de coliformes fecales. Las muestras se llevan a un laboratorio acreditado.

En la figura 3.17 se presenta una muestra del Influyente, comparado con una muestra del filtrado.



Figura 3.17 Muestra del Influyente, Filtrado y diferentes tonalidades del agua tratada con colorante.

## 4. Resultados y Análisis.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y su discusión del periodo de operación de la planta de tratamiento. Primero se discutirán los resultados durante la operación de la planta de tratamiento mencionando las propiedades del agua alimentada durante la experimentación, después se abordarán los resultados fisicoquímicos obtenidos en los muestreos y se comparan con los límites máximos permisibles de contaminantes descritos en la NOM-003-SEMARNAT-1997. Finalmente, se hablará sobre el análisis económico realizado para determinar el costo de tratar un metro cúbico y la rentabilidad del proyecto.

### 4.1 Tren de tratamiento.

El tren de tratamiento se operó durante 382 días, iniciando a finales de febrero de 2010 hasta mediados de marzo de 2011. En este periodo, se logró la estabilización de las plantas biológicas, se pusieron en marcha los equipos de tratamiento terciario para el agua tratada el día 71 de operación y finalmente se recirculó el agua hacia los sanitarios el día 293 de operación. Durante el mes de octubre de 2010 se realizó una campaña para dar a conocer el proyecto ante la comunidad del Instituto de Ingeniería, especialmente a los usuarios de los sanitarios del edificio 12 y 18, que consistió en seminarios, visitas a la planta, elaboración de carteles y trípticos con el fin de concientizar al personal sobre el reúso del agua tratada en los sanitarios. Los resultados obtenidos de este periodo de operación se muestran en la Tabla 4.1, ahí se presentan los promedios obtenidos y su desviación estándar para cada parámetro medido en cada punto de muestreo. Más adelante se discutirán los resultados detalladamente de manera gráfica. El análisis de resultados se hace énfasis en dos etapas, el periodo previo a la recirculación del agua tratada y durante la recirculación, ya que en ambos periodos se presentaron diferentes imprevistos que provocaron cambios en la eficiencia.

Tabla 4.1 Resultados promedio y desviaciones estándar obtenidas de la operación de la planta de tratamiento de agua durante 382 días.

| Parámetro+   | Influyente    | Planta 1     | Planta 2     | Microplanta  | Efluente     | Filtrado    |
|--|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| <b>Temperatura</b><br>(°C)                         | 16.90±3.34    | 16.86±3.35   | 17.05±3.33   | 16.08±3.40   | 16.66±3.31   | 16.61±3.43  |
| <b>OD (mgO<sub>2</sub>/l)</b>                      | --            | 4.36±3.35    | 5.64±3.74    | 4.83±2.77    | --           | --          |
| <b>pH</b>  | 7.65±0.39     | 7.37±0.40    | 7.31±0.83    | 7.60±0.43    | 7.71±0.39    | 7.86±0.28   |
| <b>DQO<sub>T</sub> (mgO<sub>2</sub>/l)</b>         | 580.85±199.71 | 154.22±77.80 | 154.25±78.32 | 126.65±71.90 | 146±74.29    | 135±53.27   |
| <b>DQO<sub>S</sub> (mgO<sub>2</sub>/l)</b>         | 302.41±101.24 | 106.21±52.61 | 105.40±48.18 | 95.55±56.66  | 97.15±47.15  | 102±49.54   |
| <b>SST (mg/l)</b>                                  | 115.32±75.55  | 22.73±17.77  | 22.68±14.70  | 19.35±11.96  | 23.80±16.77  | 15±9.80     |
| <b>SSV (mg/l)</b>                                  | 92.45±64.87   | 15.55±15.63  | 14.56±10.90  | 11.72±8.13   | 15.75±12.38  | 11±8.23     |
| <b>SDF (mg/l)</b>                                  | 292.06±89.37  | 267.52±81.57 | 262.20±97.36 | 279.30±86.62 | 284.37±95.34 | 284±115.90  |
| <b>Turbidez</b><br>(NTU)                           | 495±156.22    | 56.26±21.20  | 34.16±7.30   | 44.08±38.54  | 55.02±30.28  | 36.14±10.08 |
| <b>DBO<sub>5</sub> (mgO<sub>2</sub>/l)</b>         | --            | --           | --           | --           | --           | 6.66*±3.81  |
| <b>Conductividad</b><br>(μs/cm)                    | --            | --           | --           | --           | --           | 2.04±1.05   |
| <b>Coliformes</b><br><b>fecales</b><br>(NMP/100ml) | --            | --           | --           | --           | --           | N/D**       |
| <b>Cloro residual</b><br>(mg/l)                    | --            | --           | --           | --           | --           | 2.03±1.03   |
| <b>Remoción</b><br><b>DQO<sub>T</sub> (%)</b>      | --            | 73.08        | 73.00        | 76.50        | 74.72        | 77.93       |
| <b>Remoción</b><br><b>DQO<sub>S</sub> (%)</b>      | --            | 65.27        | 64.65        | 68.67        | 66.72        | 66.52       |
| <b>Remoción</b><br><b>SST (%)</b>                  | --            | 80.29        | 80.34        | 83.22        | 79.36        | 86.82       |

+ Se contabilizaron 71 muestras para DQO<sub>T</sub>, DQO<sub>S</sub>, pH, sólidos, en todos los puntos de muestreo, menos para el filtrado que se inició a operar a partir del día 71. \* Para la DBO<sub>5</sub> promedio se contabilizaron 13 datos. \*\* N/D=No Detectado, salvo en los días 251 y 267.

Para facilitar la lectura de las gráficas se dividieron en dos, en el primer grupo se compara el Influyente, Efluente y el Filtrado, mientras que en el segundo grupo se comparan solamente las plantas biológicas con el agua de alimentación.

#### 4.1.1 Tanque séptico.

El tanque séptico como ya se ha mencionado en la metodología, es el tanque que recibe el agua residual proveniente de los edificios 12 y 18. La operación de este equipo presentó algunas perturbaciones, sobre todo en el funcionamiento de las pequeñas bombas sumergibles debido a que el flujo se disminuía a causa del taponamiento en los impulsores de las bombas, provocado por el exceso de sólidos flotantes, lo que daba origen a una irregular alimentación a las plantas biológicas y un aumento del nivel de agua en el tanque séptico. Esta situación que se controló cambiando las bombas cada 7 días para realizarles limpieza. En lo que se refiere a los parámetros fisicoquímicos, el pH se mantuvo casi neutro, con un promedio de 7.65, aunque se presentaron días que el pH aumentó más de 8, debido probablemente a la adicción de sustancias alcalinas, principalmente productos de limpieza que no fueron identificados.

La concentración de  $DQO_t$  en el influente, se encontró en el intervalo de 357-1034  $mgO_2/L$ , con un promedio de 580.85  $mgO_2/L$ , este valor se encuentra entre los reportados por Henze *et. al.*, (2002), para aguas residuales domésticas. Cabe resaltar que la carga orgánica que ingresa al tanque séptico es muy variable ya que va a depender del uso de los sanitarios, es por eso la existencia de máximos y mínimos en las gráficas que se presentan más adelante. Para la  $DQO_s$  se obtuvo un promedio de 302.41  $mgO_2/L$ . En cuanto a los sólidos suspendidos se obtuvo una concentración típica de un agua residual doméstica, con un valor promedio de SST de 115.32  $mg/L$ .

#### 4.1.2 Plantas biológicas.

En las plantas biológicas es donde se lleva a cabo la mayor parte de la remoción de materia orgánica y es por ello que se debe tener especial control en esta etapa del tren de tratamiento. Durante la operación, se presentaron algunos problemas que provocaron alteraciones en su comportamiento, el más significativo fue a causa fallas en el compresor debido al uso constante. Estas fallas se dieron durante fines de semana, provocando ausencia de oxígeno en las zonas aerobias

de las plantas y por ende el decaimiento de microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Después de este hecho, las plantas pasaron a una etapa de estabilización en donde se pudo notar el aumento notorio de la DQO, SST y turbidez, este proceso de estabilización duro aproximadamente de 3 a 4 semanas, con esto se comprueba la sensibilidad del proceso. Aunado a lo anterior, se observó que la falta de aireación provoca un exceso de lodo en la superficie de los sedimentadores, el cual se tuvo que retirar algunas veces de forma frecuente de cada planta. La acumulación de lodo en este punto provoca un aumento de los sólidos suspendidos totales, así como el aumento en la turbidez del efluente. Esta acumulación de lodos también se relaciona con el desprendimiento del biogás ubicado en el interior de la cama de lodos, provocando malos olores.

#### 4.1.3 Tratamiento terciario.

En el tratamiento terciario como se ha comentado en capítulos anteriores su finalidad es la remoción de la mayor parte de los sólidos suspendidos que aún están presentes en el agua, así como la eliminación de patógenos. En este tratamiento se encuentran involucrados dos procesos, la filtración (arena sílice, filtros de carbón) y la desinfección (la dosificación de hipoclorito de sodio y luz Ultravioleta).

- Desinfección con hipoclorito de sodio.

La operación de este equipo resulto sencilla, debido a que la bomba tenía la opción de regular la dosificación. El hipoclorito como se encontraba en su máxima concentración comercial (13%), fue necesario diluirlo, así que se le agrego 1 litro del producto comercial por cada 450 litros de agua, obteniendo una concentración final de 137.82 mg/L. La velocidad de dosificación fue del orden de 25% para alcanzar una cantidad de cloro residual entre 2 a 2.5 mg/L en el segundo tanque. Con este ajuste, el tanque de la solución de hipoclorito de sodio se agotaba cada 2 días, por lo que el llenado del tanque se realizaba 3 veces por semana.

El problema en esta etapa se presentó durante la temporada de calor (marzo-mayo), al alcanzarse temperaturas ambiente de 30°C en el interior del tanque, lo que redujo la solubilidad del hipoclorito de sodio en el interior del tanque de almacenamiento, por lo que se obtuvo una concentración de cloro residual de 1mg/L, incluso en algunas ocasiones no existía cloro residual. Ante esta situación fue necesario incrementar la velocidad dosificación de cloro residual hasta 40% para asegurar la concentración de cloro residual deseado.

- Filtración.

Durante la filtración se estableció un periodo para el retrolavado, con el fin de eliminar la acumulación de sólidos en los filtros- El retrolavado se planteó realizarlo una vez por semana, aunque en temporada de lluvias o la estabilización de plantas biológicas se filtraba agua con más lodo; ante esta situación fue necesario realizar el retrolavado dos veces por semana, con el fin de evitar la saturación en los filtros. La remoción de sólidos suspendidos totales después del filtrado fue del 86%, obteniendo la mayor remoción de todos los puntos de muestreo analizados.

- Luz UV.

La operación de este equipo fue sencilla. Se activaba de manera manual cada vez que se filtraba el agua hacia el segundo tanque de almacenamiento, el problema que se presentó en este equipo fue la adhesión de biopelícula en la lámpara, esto puede constituirse como un problema a mediano plazo debido a que se reduce la eficiencia de transmisión de luz emitida. Ante esta situación fue necesario revisarla cada mes y limpiarla. La calidad del agua en cuanto a parámetros fisicoquímicos a la salida de este equipo fue prácticamente la misma que se obtenía a la salida de los filtros, por eso se optó eliminar este punto de muestreo, aunque para el muestreo de coliformes fecales si se tomaba la muestra a la salida de la lámpara. Los resultados demostraron la ausencia total de coliformes fecales, salvo en dos muestreos, pero por debajo de la norma NOM 003.

## 4.2 Parámetros fisicoquímicos y biológicos.

En esta sección se realiza la discusión de los resultados obtenidos de cada parámetro determinado durante la operación de la PTAR. Como ya se mencionó, para facilitar la discusión y visualización de las gráficas se dividió en dos partes para cada parámetro medido, mostrando en una la comparación de influente con el efluente y el filtrado (sistema) y la segunda el influente con cada uno de efluentes de las plantas biológicas (plantas biológicas únicamente).

### 4.2.1 pH

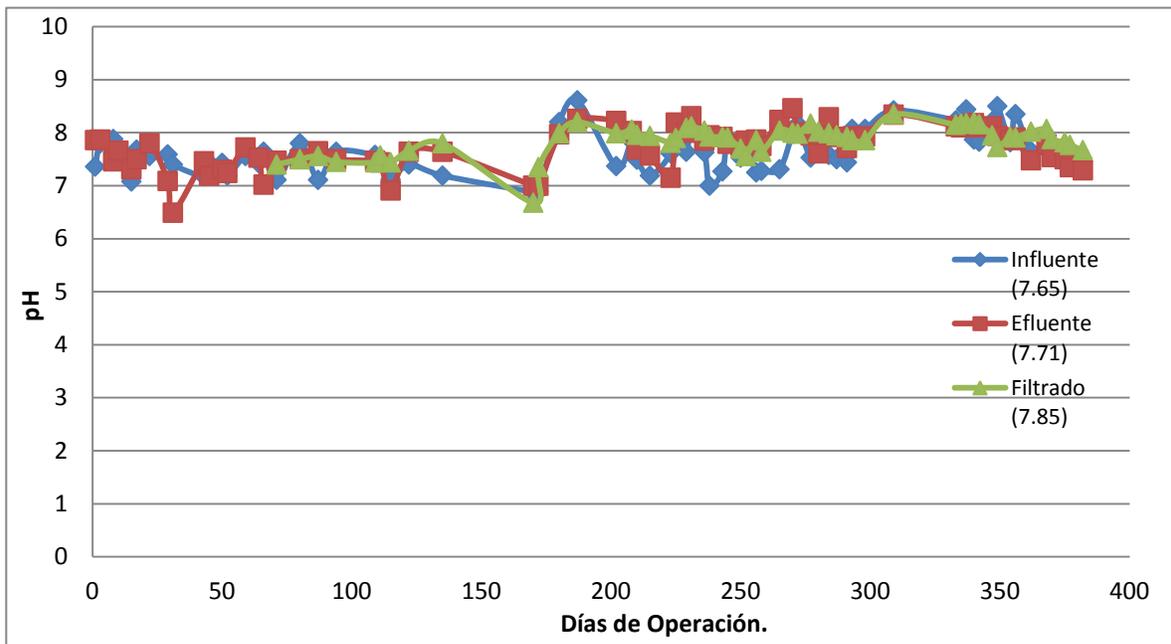


Figura 4.1 Evolución del pH durante la operación de la PTAR en el Influyente, Efluente y Filtrado.

En la figura 4.1 se observa la evolución del pH durante el periodo de operación de la PTAR. Se puede apreciar que los valores obtenidos en los tres puntos de muestreo son ligeramente básicos, aunque comparando el pH del influente con los otros dos puntos (Efluente y Filtrado) se tiene un ligero incremento. Esto se debe a la adición del hipoclorito de sodio en la línea de tubería, ya que como el pH del

hipoclorito es básico, puede incrementar ligeramente los valores de pH del efluente y el filtrado. Estos valores concuerdan con lo reportado por Jiménez (2002), pues el pH del agua residual doméstica, en general, es ligeramente alcalino ( $\text{pH} > 7$ ) por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos, que pueden provenir de diferentes productos de limpieza de los baños.

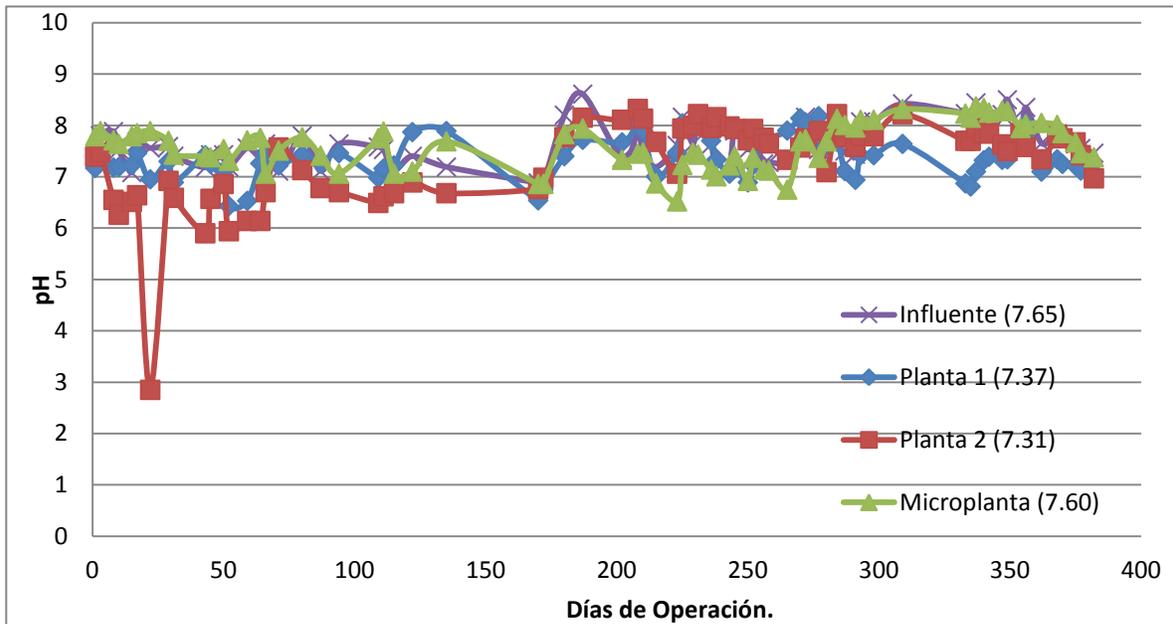


Figura 4.2 Evolución del pH durante la evolución de la PTAR en las plantas biológicas.

En este gráfico (fig. 4.2) se muestra la evolución del pH durante la operación de las plantas biológicas. Se puede observar que la planta 2 durante los primeros 150 días de operación presentó valores por debajo de 7 unidades y en ocasiones cercano a 6, así mismo, esta planta tuvo un descenso drástico del pH hasta valores por debajo de 3 unidades durante el día 22 de operación, esto se debió probablemente al desecho de reactivos ácidos al drenaje, lo que provocó una alteración en el pH de esta planta. Posteriormente, la planta 2 alcanzó valores estables, con un promedio de 7.31. La planta 1 durante toda la operación se mantuvo estable, con un promedio de 7.37, ligeramente por arriba de la neutralidad. Finalmente, en la microplanta se obtuvo un valor promedio de 7.60, fue la planta biológica que presentó valores más altos en el pH, pero siempre en el

intervalo reportado por Ferrer *et. al.*, (2007) para una pequeña planta de tratamiento de lodos activados.

#### 4.2.2 Temperatura y Oxígeno Disuelto.

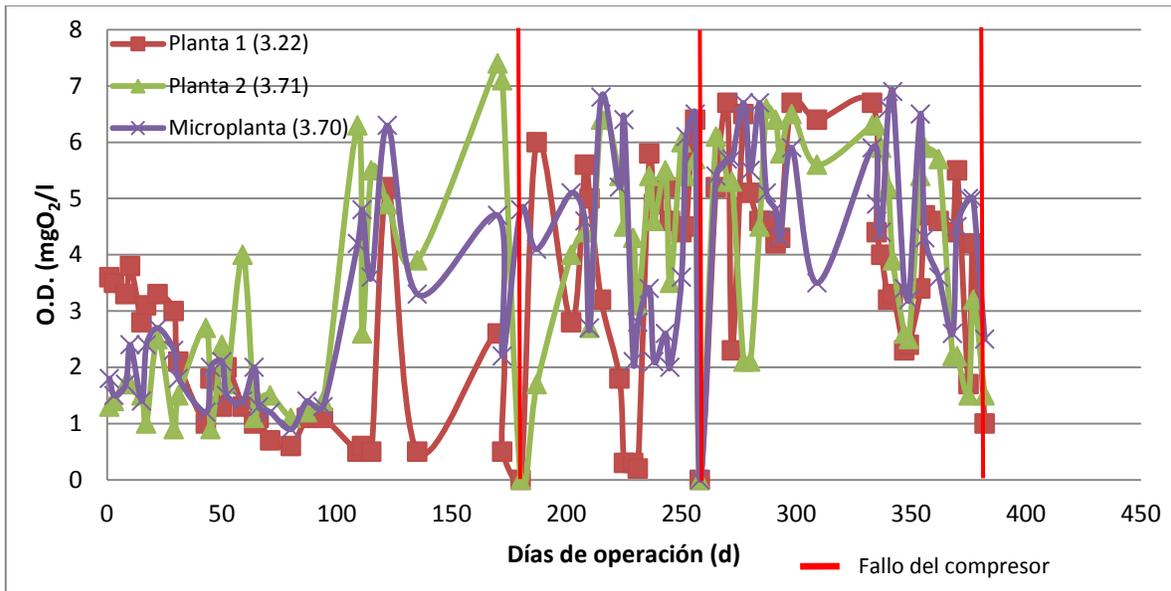


Figura 4.3 Oxígeno disuelto en las plantas biológicas.

El oxígeno disuelto está relacionado directamente con la temperatura, debido a la difusividad del oxígeno en el agua: a mayor temperatura, la solubilidad del oxígeno en el agua es menor.

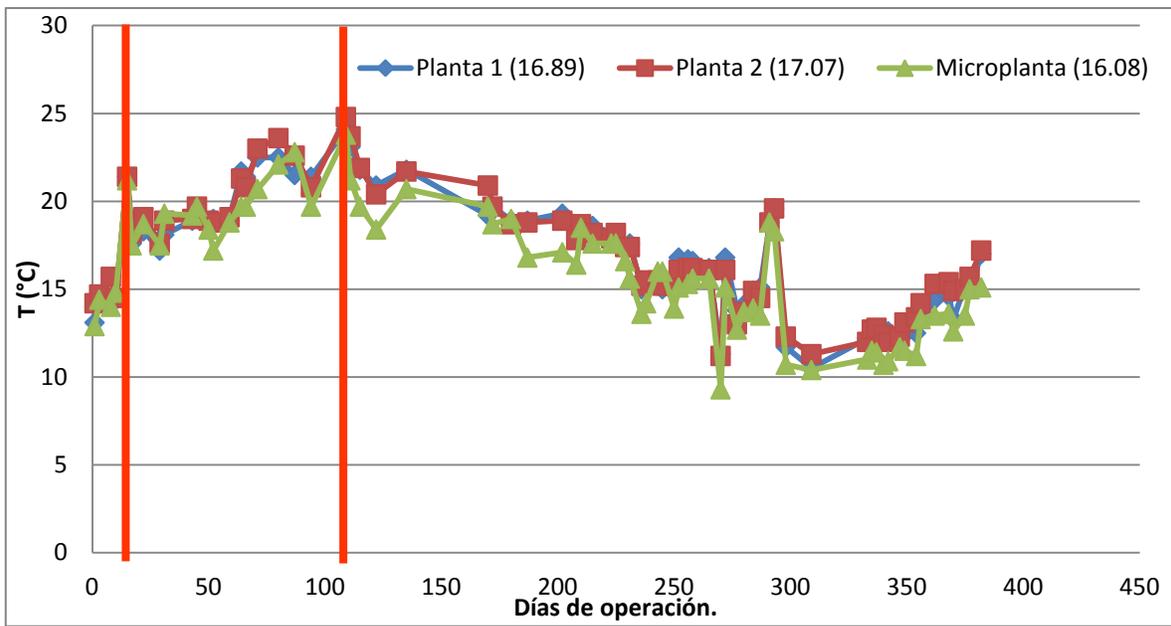


Figura 4.4 Temperatura en las plantas biológicas.

El tren de tratamiento presentó variaciones de temperatura significativas en función de la temporada del año. En el periodo de marzo a mayo (periodo comprendido entre las líneas naranjas), que es temporada de secas y de alta temperatura, se puede observar que la cantidad de oxígeno disuelto en las tres plantas es muy bajo, entre 1 a 2.5 mg/l como se aprecia en la figura 4.3. Conforme avanzaba el año se empezó a ver un aumento en el oxígeno disuelto, esto se debió principalmente al descenso de la temperatura con la llegada de la temporada de lluvias.

Se puede observar que a lo largo de la gráfica se presentan diferentes picos, esta inestabilidad de la gráfica se debe a dos aspectos:

1) La temperatura y el oxígeno disuelto se midieron *in situ*, específicamente en la cámara de aireación en donde se debe de tener un registro sobre la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Para las plantas 1 y 2 el acceso para introducir el electrodo en la cámara era complicado, así que no se tenía un punto exacto, este puede ser un factor importante, debido la falta de aireación uniforme en toda la cámara, así que en algunos puntos en donde se ve disminuido drásticamente el

oxígeno se deba a que el electrodo fue introducido en ciertas zonas donde no hay una buena aireación.

2) La falla del compresor fue un factor determinante a la falta de oxígeno en las plantas biológicas, en los días 180 y 258, que fue cuando el compresor presentó fallas, debido a la falta de mantenimiento. En estos días no se obtuvo oxígeno disuelto en ninguna planta, aunque las plantas 1 y 2 tienen un compresor integrado cada una, no fue suficiente para alimentar toda la cámara. La microplanta fue la que se vio más afectada debido a que depende directamente del compresor que se tiene en la bodega anexa al PTAR. En el día 375 el compresor sufrió una tercera falla, pero esta falla no afectó de forma significativa a la PTAR, debido a que se tomaron las medidas preventivas.

El promedio de oxígeno disuelto para la planta 1 fue de 3.22 mg/l, para la planta 2 3.71 mg/l y para la microplanta se obtuvo un promedio de 3.70 mg/l. Estos valores muestran una tendencia central que entran dentro del rango establecido para tener una aireación adecuada, salvo en los días cuando se presentó la falla en el compresor. Este valor es muy adecuado para el crecimiento y desempeño los microorganismos en el interior de las plantas biológicas.

#### 4.2.3 Demanda Química de Oxígeno.

Para presentar el comportamiento de este parámetro se consideraron dos etapas de operación: una antes de la recirculación hacia los sanitarios y la segunda después de la recirculación. Las gráficas presentan estos periodos y se identifican con líneas punteadas los rearranques de la PTAR, después de un periodo vacacional.

## 4.2.3.1 DQO Total.

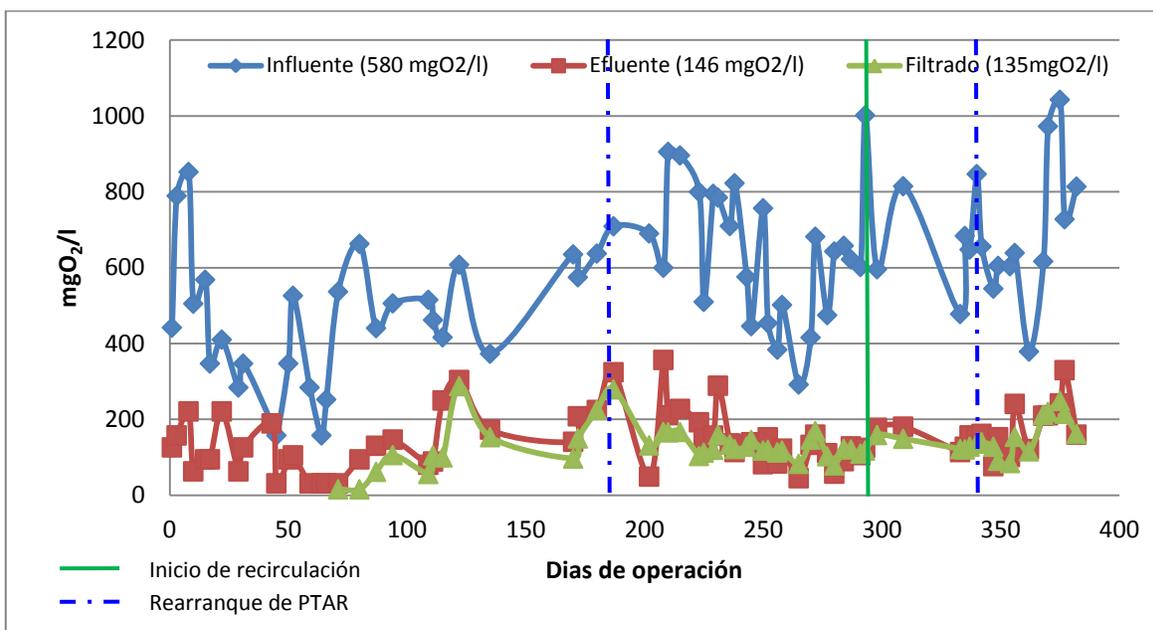


Figura 4.5 Evolución de la Demanda Química de Oxígeno Total en Influyente, Efluente y Filtrado.

En la figura 4.5 se presentan los diferentes valores obtenidos de DQO Total para el influente, efluente (mezcla de las tres plantas) y filtrado durante el periodo de muestreo. Existen varios factores que influyeron, para la remoción de DQO en el agua, entre los que destaca las fallas mecánicas del compresor que suministra aire a la PTAR, al tener estas fallas durante los días de operación 180 y 258, se observa que aumentó la concentración de DQO en el efluente por falta de aire. Ante tal circunstancia, las zonas aerobias se transforman en zonas anaerobias, y con ello menor remoción de DQO. Otro factor que influyó en la remoción de DQO son los rearranques que presentó la planta después de los periodos vacacionales; se observa un incremento en la DQO, debido a la estabilización de las plantas biológicas, aproximadamente se tardan dos semanas en alcanzar de nuevo una fase estable. La adición de colorante en el día 340 influyó en el aumento de DQO, debido a que el colorante no se puede oxidar por completo. Para comprobar esta hipótesis se realizó por triplicado una DQO total de influente adicionándole colorante y otra muestra sin adicionar colorante. Al obtener los resultados se

comprobó que la DQO total del influente con colorante se incrementó en un 8.88% con respecto a la DQO total del influente sin colorante. Se realizó la misma prueba pero con agua filtrada, también existió un incremento, esta vez del 10.73% en la DQO total.

Como se muestra en la tabla 4.1, el valor promedio de DQO total en el influente es de 581 mgO<sub>2</sub>/l, mientras que en el efluente (sin filtrar) se obtuvo un valor promedio de 146 mgO<sub>2</sub>/l, teniendo una eficiencia de remoción del 74%, mientras para la filtración, se obtuvo un valor promedio de 135 mgO<sub>2</sub>/l, con una eficiencia de remoción del 78%.

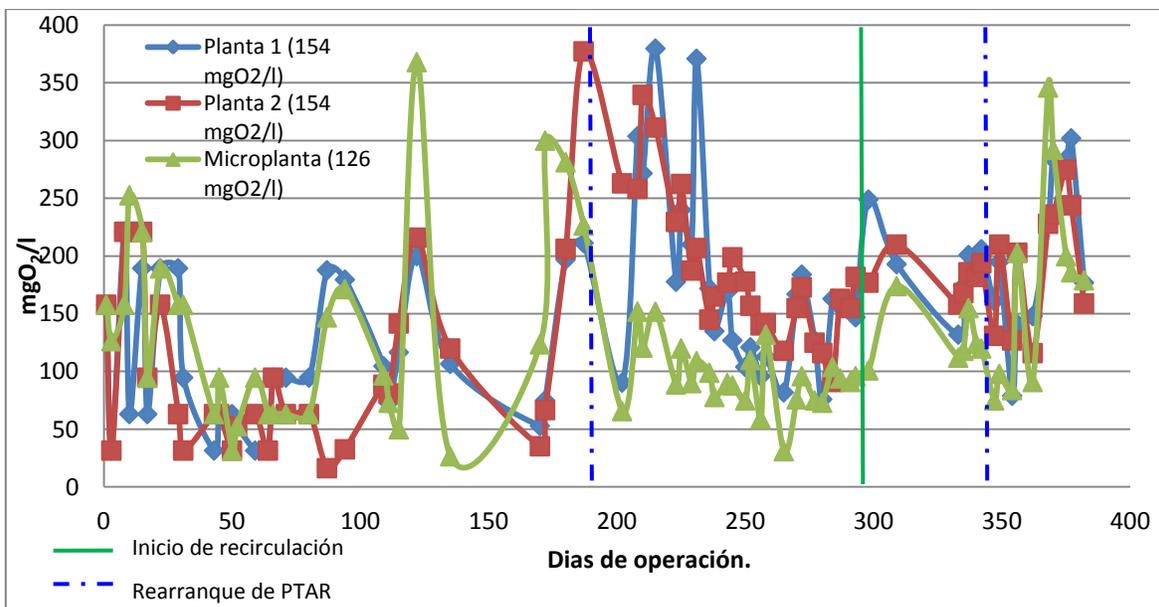


Figura 4.6 Evolución de la Demanda Oxígeno Total en las plantas biológicas.

Para la figura 4.6 se hace el comparativo de las tres plantas paquete. Se puede observar que estos procesos presentan cierta sensibilidad, por ese motivo se presentan picos elevados en diferentes días de operación. La falla en el compresor, el colorante en la etapa de recirculación y muchas veces la alta carga orgánica proveniente del tanque séptico propiciaron la acumulación de lodo en las plantas biológicas por lo que se obtuvieron valores elevados en la DQO, debido a que el efluente de las plantas arrastraba en su sobrenadante algunos sólidos suspendidos, pero jamás sobrepasaron valores de 400 mgO<sub>2</sub>/l. Una medida importante que se consideró para evitar que los sólidos suspendidos tuvieran

influencia significativa en el incremento de la DQO, fue la purga de lodos en cada planta paquete, obteniendo de cada planta una cantidad de 20 litros de lodo concentrado, así se disminuyó la cantidad de materia orgánica presente en el agua.

Para la planta número uno se obtuvo un valor promedio de 154 mgO<sub>2</sub>/l de DQO, teniendo un porcentaje de remoción del 73%, mismo valor que obtuvo la planta dos. En cuanto la microplanta o planta AAA, se obtuvo un valor promedio de 126 mgO<sub>2</sub>/l con un porcentaje de remoción de 77%. Al comparar las tres plantas se observa que la microplanta es la que tuvo mejor desempeño, muy probablemente a que tiene tres procesos involucrados (Anóxico, Anaerobio, Aerobio); también influye la configuración interna de la planta, debido a que en la microplanta tiene zonas de flujo ascendente y descendente provocando un flujo que tiende al tipo pistón, y con ello un mayor TRH real del agua, al reducir al mínimo los cortos circuitos hidráulicos. Para las otras plantas, se observa que la remoción es idéntica, aunque no están muy alejados del valor de la microplanta.

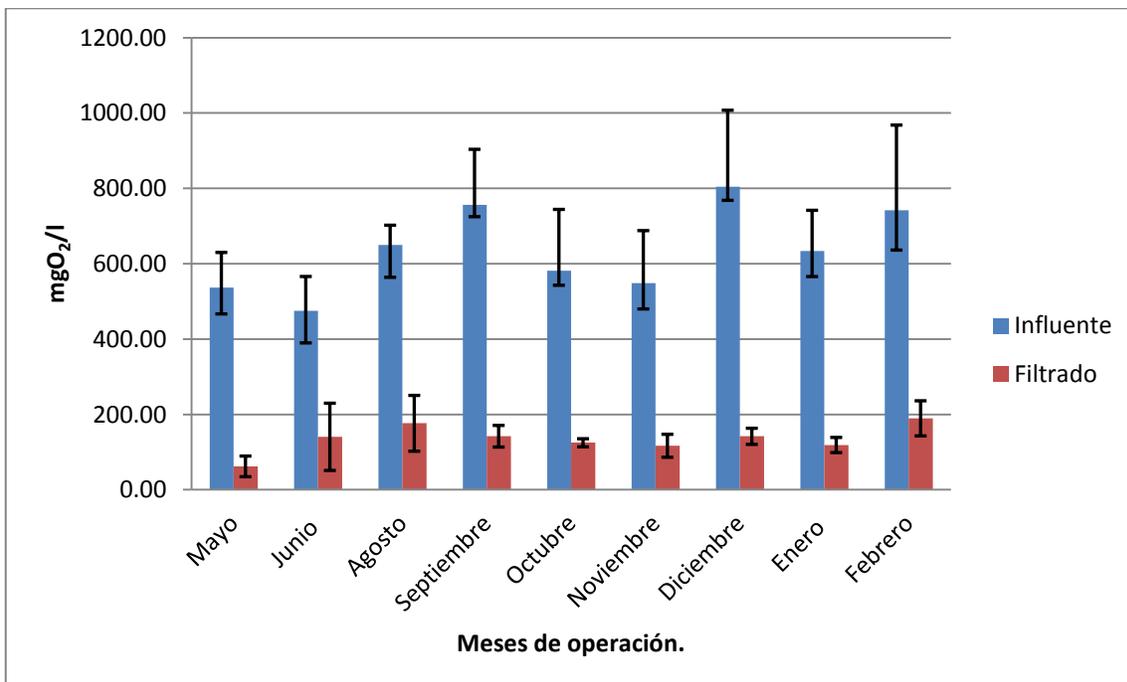


Figura 4.7 Comparación de la DQO total del influente y el filtrado durante los meses de operación.

En la figura 4.7 se observa la comparación del influente con el filtrado durante los meses de operación. Se aprecia que al inicio de la operación de los filtros (mes de mayo) se consiguieron altos niveles de remoción de DQO, en comparación a la concentración que entraba al sistema (Influente). Sin embargo, conforme fueron avanzando los meses se observa un aumento en la concentración de DQO total a la salida de los filtros, pero se mantiene aproximadamente la misma remoción, ya que el influente también se incrementa.. De octubre a enero, se alcanzó un periodo estable en la PTAR ya que se pudo controlar de manera más rigurosa algunas perturbaciones. Esta estabilidad de se vio reflejada en la DQO total, puesto que se mantuvo en valores muy similares a pesar de los cambios en la alimentación. Por otra parte, en febrero se observa un incremento de la DQO total ocasionado por el re arranque del proceso (regreso del periodo vacacional), así como por la introducción del colorante, lo que provocando una disminución de la eficiencia de remoción.

#### 4.2.3.2 DQO Soluble.

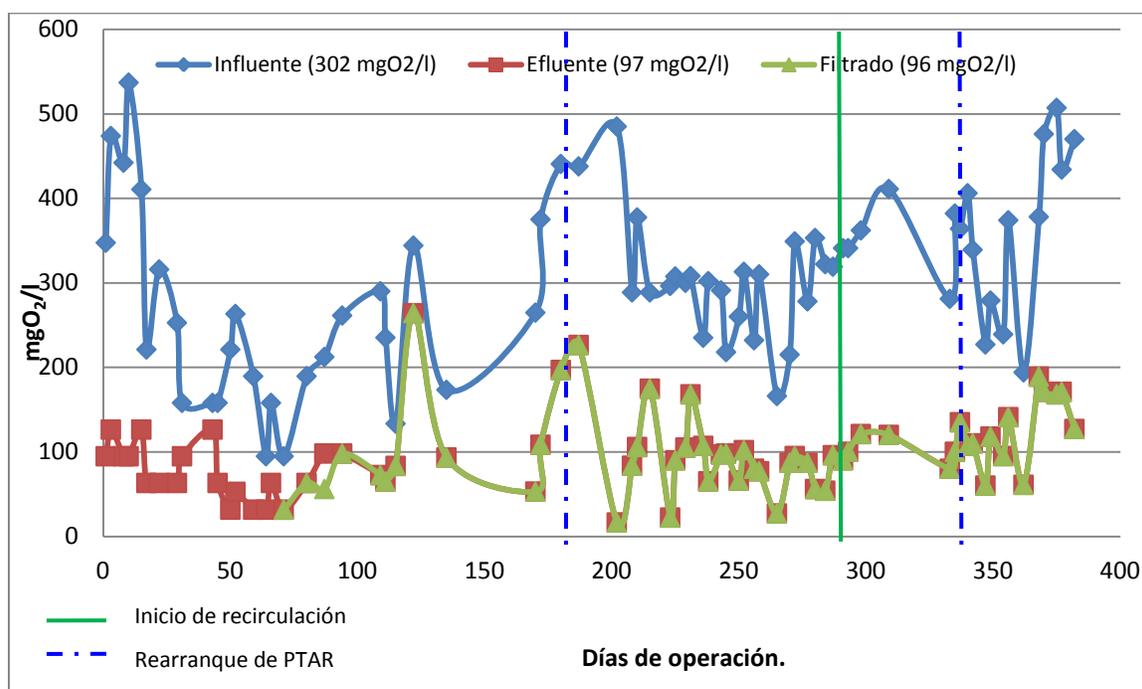


Figura 4.8 Evolución de la Demanda Química de Oxígeno Soluble en el Influyente, Efluente y Filtrado.

En la figura 4.8 se observa una amplia variación en la DQO soluble del influente, con valores menores entre los días 25 y 75, a una disminución de la carga orgánica proveniente del tanque séptico. También es notoria la similitud en las concentraciones alcanzadas en el efluente y en el filtrado. La remoción en este parámetro fue del 52%. Como se presentó en la tabla 4.1, el valor de DQO soluble promedio para el influente fue de 302 mgO<sub>2</sub>/l. Para el efluente y filtrado se observaron valores prácticamente iguales; 98 mgO<sub>2</sub>/l en el efluente y 102 mgO<sub>2</sub>/l en el filtrado, nótese que el filtrado presenta un valor relativamente mayor que en el efluente, pero esto no es significativo estadísticamente, por las desviaciones estándar asociadas a cada promedio (ver tabla 4.1).

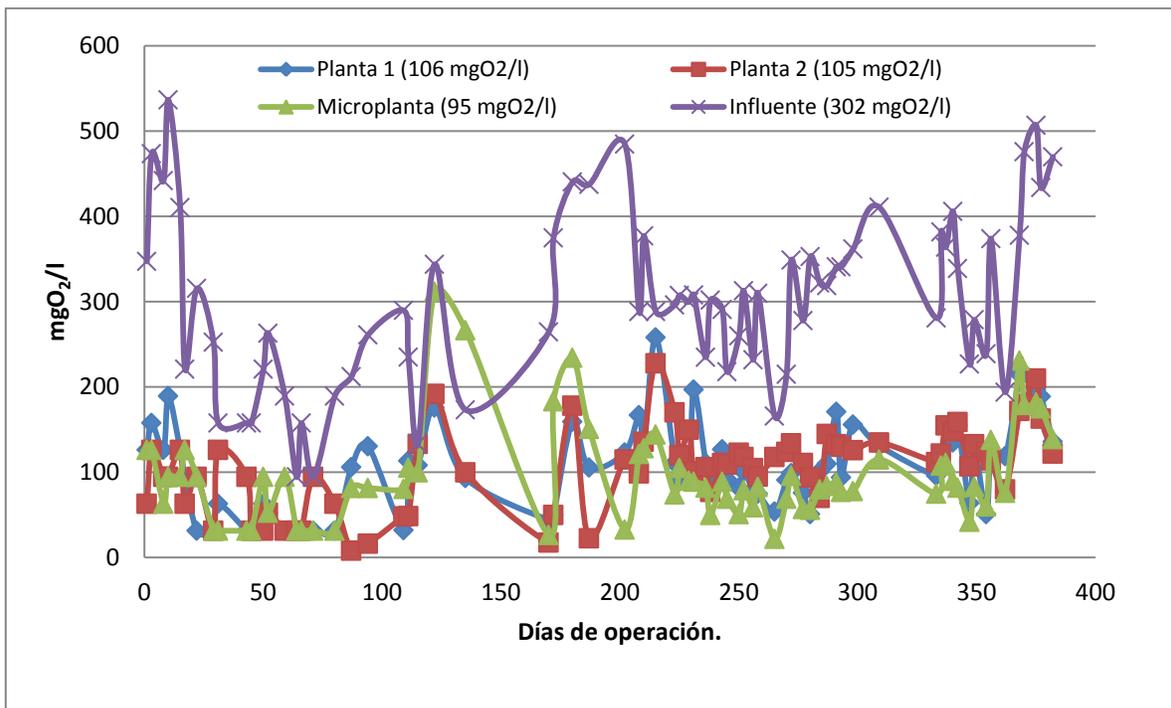


Figura 4.9 Evolución de la Demanda Oxígeno Soluble en las plantas biológicas.

En la figura 4.9 se observó que se mantiene la misma tendencia que se reflejó para a la DQO total de las tres plantas, en donde la microplanta muestra una DQO soluble ligeramente menor a la de las plantas 1 y 2. Este comportamiento confirma que la microplanta tuvo una mejor capacidad para degradar la materia orgánica, con un valor promedio de la DQO soluble de 95 mgO<sub>2</sub>/l. Para la planta 1 y planta

2, se alcanzaron valores promedio de 110 mgO<sub>2</sub>/l y 105 mgO<sub>2</sub>/l respectivamente. Sin embargo, como se puede notar en la tabla 4.1, la diferencia entre ambas plantas no fue significativa.

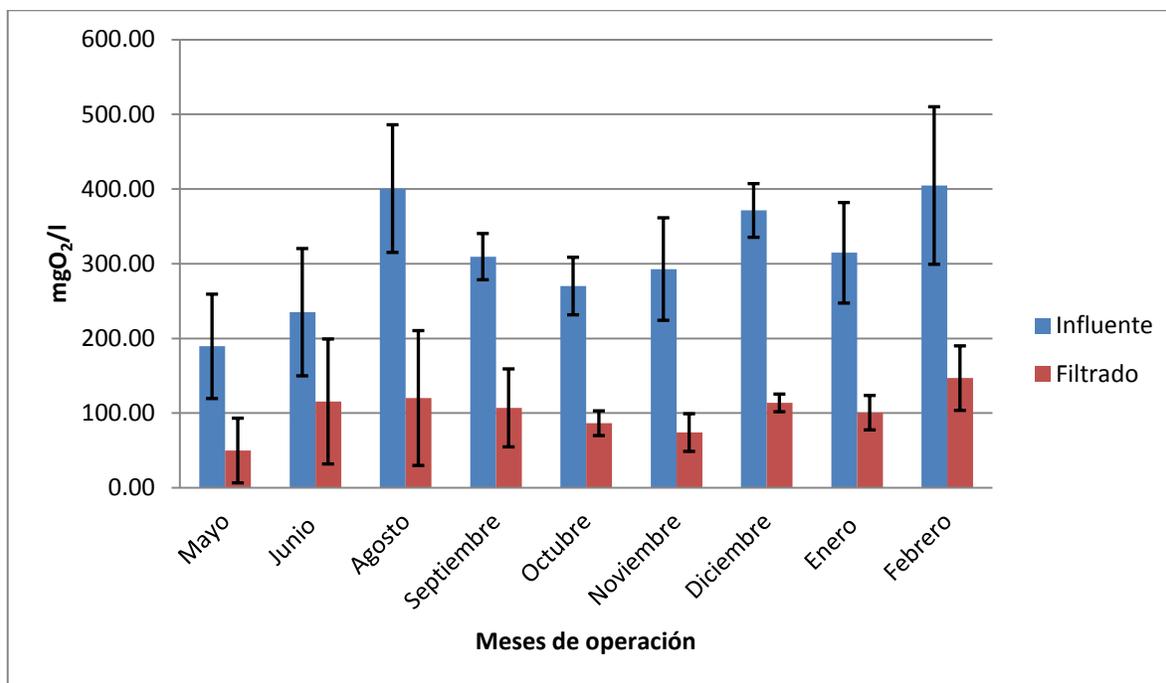


Figura 4.10 Comparación de la DQO Soluble del influente y el filtrado durante los meses de operación.

En la figura 4.10 se observa la evolución de la DQO soluble durante los meses de operación. Al igual que con la DQO total (Fig. 4.7), en el primer mes se alcanzó una alta eficiencia y en los meses intermedios se alcanzó la estabilidad deseada y finalmente se elevó de nuevo la DQO a finales de la experimentación a causa de la incorporación del colorante.

#### 4.2.3.3 Influencia de los eventos ocurridos de la PTAR en la DQO.

Durante la operación de la PTAR, existieron diferentes eventos que influenciaron en la DQO total y soluble en los efluentes de las plantas biológicas y el filtrado. Estos eventos no se presentaron durante todo el tiempo de operación, sino en dos periodos específicos. Es por eso que en esta sección se hace una discusión

más a fondo sobre estos dos intervalos de tiempo. Los eventos a destacar en la operación de la PTAR fueron:

- Rearranque de la PTAR (días 170, 333).
- Inicio de la recirculación (día 293).
- Fallo del compresor (días 208, 368).
- Incorporación del colorante (día 340).

Para la facilitar la lectura los datos obtenidos se separaron en dos bloques, el primer bloque de datos incluye el primer rearranque de la PTAR y el primer fallo del compresor en los días 170 y 208, respectivamente. El segundo bloque comprende el inicio de la recirculación (día 293), segundo rearranque de la PTAR (día 333), la incorporación del colorante (día 340) y el segundo fallo del compresor (día 368).

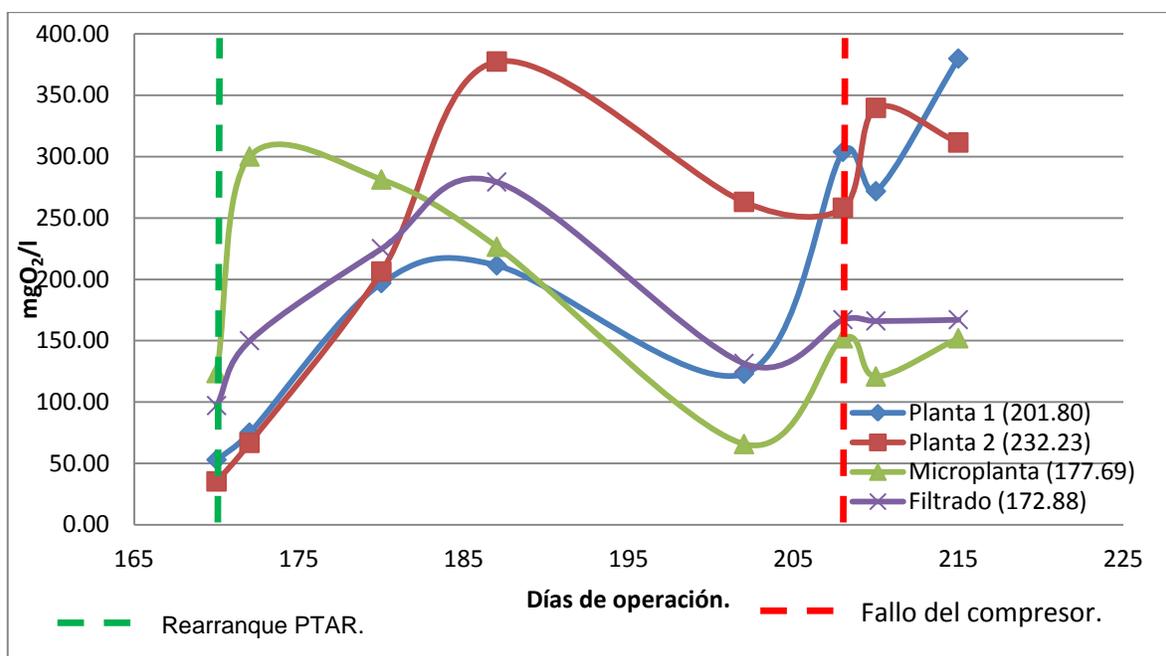


Figura 4.11 DQO total entre los días 170-215.

En la figura 4.11 se observa el periodo comprendido entre los días 170-215 con los promedios durante ese lapso de días. Este periodo es importante discutir, porque durante este periodo se inició el primer rearranque de la PTAR (después de concluir el periodo vacacional Julio 2010). Como se puede observar, durante el

primer muestreo realizado después del rearranque de la PTAR se obtuvieron en la planta 1 (53 mgO<sub>2</sub>/l), planta 2 (35 mgO<sub>2</sub>/l), microplanta (124 mgO<sub>2</sub>/l) y filtrado (97.06 mgO<sub>2</sub>/l) valores bajos, porque durante el periodo vacacional se incrementó el TRH de las plantas al no tener nueva alimentación que permitiera el desplazamiento del agua que ya se encontraba tratada. Esta tendencia en la DQO se mantuvo durante primera semana. Para la segunda semana, después del rearranque (día 180 de operación), se empezó a observar un crecimiento significativo en la DQO, aumentando en la planta 1 hasta 197 mgO<sub>2</sub>/l, en la planta 2 a 206 mgO<sub>2</sub>/l, la microplanta se incrementó a 300 mgO<sub>2</sub>/l y el filtrado a 150 mgO<sub>2</sub>/l, esta tendencia alcanzó su máximo para la planta 1 y planta 2 el día 187 de operación, mientras que la microplanta en el día 172 alcanzó su máximo. Para el día 202 de operación, se empezaron a estabilizar las plantas. En el día 208, se presentó una nueva perturbación. Debido a un falló en el compresor que alimenta de aire a las tres plantas biológicas, ubicado en una bodega anexa a la planta. Este problema fue detectado un día después de la falla del compresor, así que se solicitó el mantenimiento del mismo, pero, aún así la falta de aire proveniente de este compresor, influyó nuevamente en el incremento de la DQO. Estabilizándose una semana después.

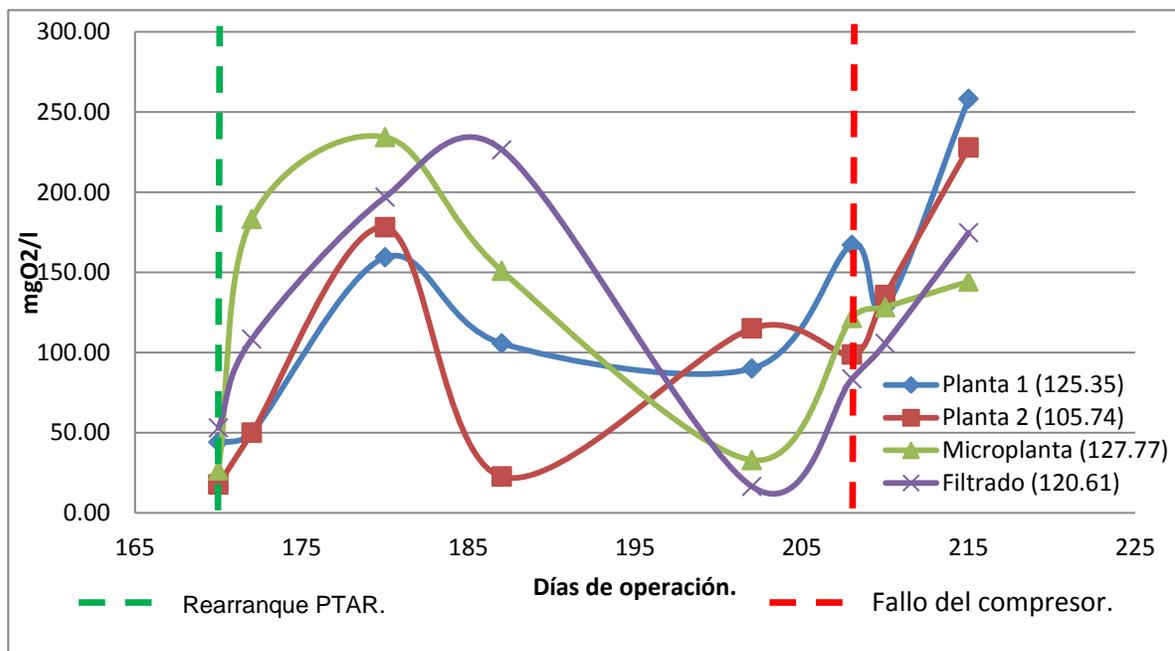


Figura 4.12 DQO soluble entre los días 170-215.

De igual manera en la DQO soluble (figura 4.12), conserva la misma tendencia que la DQO total. De igual manera, fue afectada por los eventos mencionados, pero con la diferencia que la concentración de DQO es menor. Los datos obtenidos después del primer rearranque fueron para la planta 1, 44 mgO<sub>2</sub>/l, la planta 2, 18 mgO<sub>2</sub>/l, la microplanta 26 mgO<sub>2</sub>/l y el filtrado con 53 mgO<sub>2</sub>/l. Cuando ocurrió falla del compresor en el día 208 también afectó la DQO soluble, obteniendo para la planta 1 un valor de 167 mgO<sub>2</sub>/l, para la planta 2, 99 mgO<sub>2</sub>/l, en la microplanta 122 mgO<sub>2</sub>/l y finalmente, para el filtrado 84 mgO<sub>2</sub>/l. Estos valores están elevados a comparación de lo que se había estado reportando para la DQO soluble en días previos al fallo del compresor. También existió un incremento en la DQO soluble, hasta llegar a un periodo de estabilidad. En la tabla A1.1 del anexo se incluyen los datos de DQO total y soluble para el primer periodo.

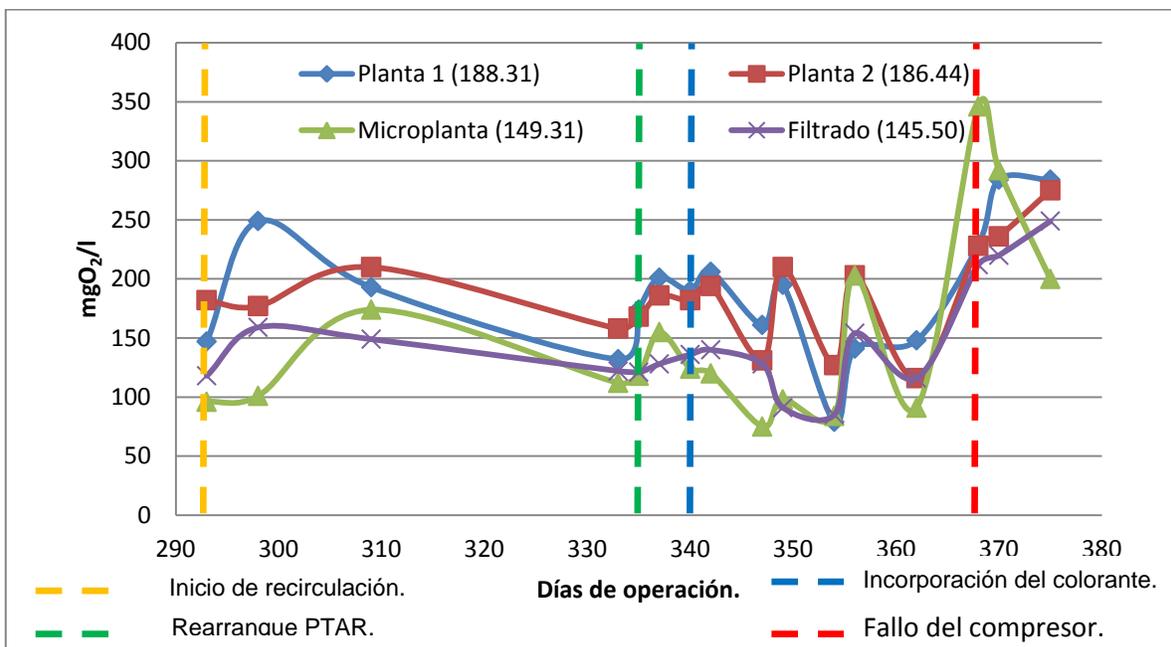


Figura 4.13 DQO total entre los días 293-375.

En la figura 4.13 se aprecia el segundo periodo. Este periodo comprende más días, pero en él se incluyen los primeros días de la recirculación del agua hacia los sanitarios, así como la adición del colorante en la línea de tubería de la PTAR, un segundo rearranque después de un periodo vacacional (diciembre 2010), finalmente, un segundo fallo en el compresor.

Durante las últimas semanas del semestre, se empezó a recircular el agua tratada hacia los sanitarios del edificio 12 y 18, con el fin de observar el comportamiento de la planta. En el primer muestreo (después de la recirculación), se obtuvieron los siguientes valores: para la planta 1 de 147 mgO<sub>2</sub>/l, la planta 2 182 mgO<sub>2</sub>/l, la microplanta 96 mgO<sub>2</sub>/l y en el filtrado 118 mgO<sub>2</sub>/l. Se observa un ligero incremento en la DQO total conforme van avanzando las semanas. A mediados de diciembre (día de operación 309), se paró la planta debido al periodo vacacional. Para el re arranque (día 333), se observó el mismo fenómeno presentado en el re arranque anterior (véase figura 4.11 y 4.12). La DQO se mantuvo estable durante la primera semana y para la segunda semana se volvieron a disparar los valores de DQO en todos los puntos de muestreo, solo que la estabilización duró menos tiempo. Para el día 340 se decidió añadir el colorante a la línea de tubería; a los pocos días se empezó a incrementar la DQO. Días más tarde, se presentó el segundo fallo del compresor, en donde se obtuvieron valores por arriba de 250 mgO<sub>2</sub>/l en todos los puntos de muestreo. Al final de la experimentación, se logró estabilizar la PTAR pero no se pudo disminuir la DQO a valores por debajo del 150 mgO<sub>2</sub>/l.

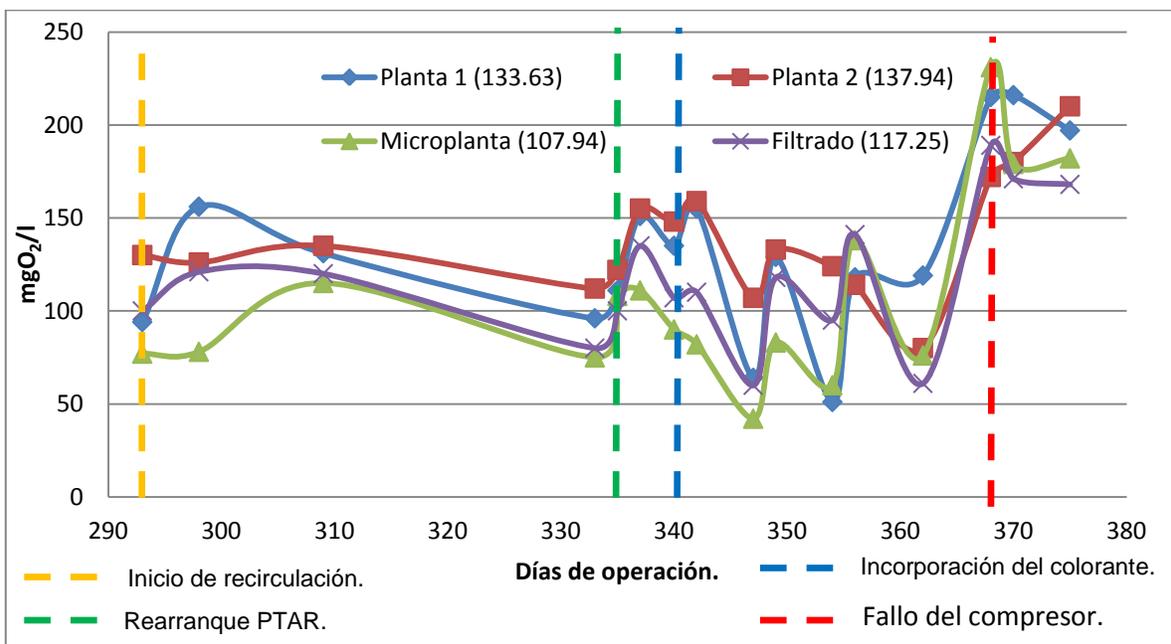


Figura 4.14 DQO soluble entre los días 293-375.

En la figura 4.14 se muestran los resultados de la DQO soluble para el segundo periodo (días 293-375 de operación). Como ocurrió en el primer periodo, la DQO soluble mantuvo la misma tendencia que la DQO total en los eventos mencionados. Los datos obtenidos durante el inicio de la recirculación fueron: planta 1, 94 mgO<sub>2</sub>/l, planta 2, 130 mgO<sub>2</sub>/l, microplanta 77 mgO<sub>2</sub>/l y filtrado 100 mgO<sub>2</sub>/l. Después del periodo vacacional, se inició el re arranque de la PTAR, como se ha mencionado. Los primeros valores obtenidos resultaron bajos, pero conforme fueron avanzando los días, la DQO soluble también empezó a incrementarse, especialmente, cuando se le añadió el colorante. En tales condiciones se obtuvo para la planta 1 un valor de 135 mgO<sub>2</sub>/l, para la planta 2 148 mgO<sub>2</sub>/l, en la microplanta 90 mgO<sub>2</sub>/l, finalmente, para el filtrado un valor de 107 mgO<sub>2</sub>/l. Igualmente, conforme fueron avanzando los días, la DQO soluble se incrementó a causa de fallas en el compresor. En la tabla A1.2 del anexo se incluyen los datos de DQO total y soluble para el segundo periodo.

4.2.4 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>).**Tabla 4.2 Evolución de la DBO<sub>5</sub> del filtrado, durante la operación de la PTAR.**

| Fecha           | Días de operación | DBO <sub>5</sub> (mg/l) |
|-----------------|-------------------|-------------------------|
| 14/09/2010      | 216               | 5                       |
| 15/10/2010      | 247               | 6                       |
| 22/10/2010      | 254               | 15                      |
| 29/10/2010      | 260               | N/D                     |
| 05/11/2010      | 267               | N/D                     |
| 10/11/2011      | 272               | N/D                     |
| 15/11/2010      | 277               | 4                       |
| 19/11/2010      | 281               | 4                       |
| 26/11/2010      | 288               | 4                       |
| 19/01/2011      | 342               | 11                      |
| 09/02/2011      | 363               | 5                       |
| 25/02/2011      | 379               | 6                       |
| <b>Promedio</b> |                   | 6.66                    |

En la tabla 4.2 se reportan los resultados de la DBO<sub>5</sub> durante los muestreos seleccionados para el filtrado, análisis realizados por un laboratorio externo y debidamente acreditado. Al apreciar los resultados se observa que se tuvo una buena remoción de materia orgánica, muy por debajo de lo señalado en la NOM 003-SEMARNAT-1997, que da un máximo permisible de 20 mg/l de DBO<sub>5</sub> para contacto directo por parte de los usuarios, y 30 mg/l para contacto indirecto u ocasional. El promedio general de los muestreos fue de 6.66 mg/l, lo cual indica que las plantas biológicas tuvieron una excelente degradación de la materia orgánica y que la mayor parte del material que entra a la planta es materia orgánica biodegradable.

Comparando estos valores con la DQO total, se comprueba que se tiene resultados altos con respecto a los reportados en la DBO<sub>5</sub>, esto se debe a que

durante la recirculación se presentó una acumulación de materia orgánica recalcitrante e inorgánica, que es de difícil degradación para los microorganismos, para estos casos es necesario ocupar algún método químico para lograr la remoción de la materia inorgánica acumulada.

#### 4.2.5 Sólidos suspendidos.

En esta sección se analizaron los resultados de los SST y su relación con los SSV obtenidos durante la operación de la PTAR. De igual manera, para facilitar la lectura de las gráficas se dividieron en dos, en el primer grupo se compara el Influyente, Efluente y Filtrado, mientras para el segundo grupo se realiza el análisis de las tres plantas biológicas.

##### 4.2.5.1 Sólidos Suspendidos Totales.

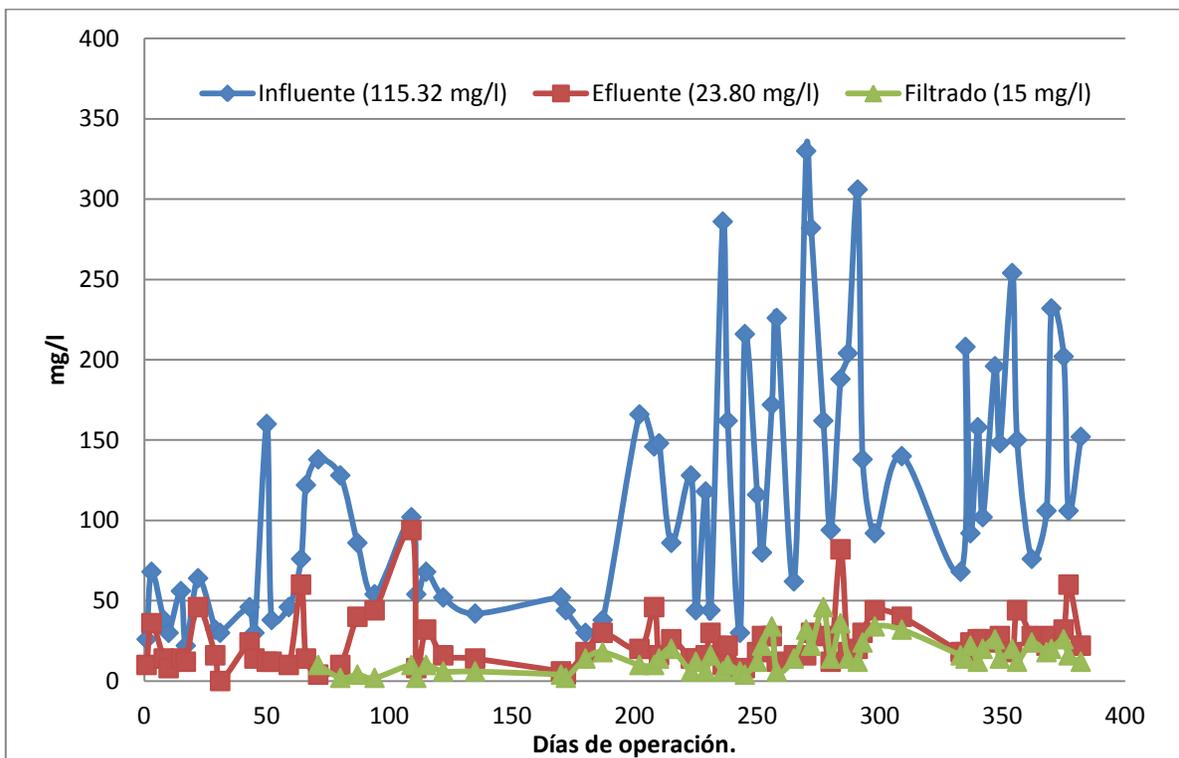


Figura 4.15 Evolución de los Sólidos Suspendidos Totales el Influyente, Efluente y Filtrado.

En la figura 4.15 se observa la evolución de los sólidos suspendidos totales durante la operación de la PTAR, se puede observar que el influente se comportó de una forma muy irregular, teniendo picos a lo largo de la operación. En este punto de muestreo se obtuvo un promedio de 115 mg/l, valor que se encuentra dentro del promedio establecido para las aguas residuales típicas sin tratamiento (Metcalf and Eddy, 1991).

En el efluente (mezcla de las tres plantas biológicas) se observan incrementos principalmente debido a que en esos días alguna de las tres plantas biológicas pudo haber presentado una acumulación de lodo y éste ser arrastrado en el efluente, haciendo que se elevara la concentración de sólidos suspendidos totales para este punto de muestreo. Durante los primeros días de operación, el efluente presentó inestabilidad, principalmente por la irregularidad de las plantas biológicas al principio de la operación. Conforme fueron avanzando los días se redujo la concentración de sólidos suspendidos hasta alcanzar valores estables por debajo de la NOM 003-SEMARNAT-1997, para contacto indirecto u ocasional del agua tratada (20 y 30 mg/l, respectivamente). El valor promedio de SST del efluente durante el monitoreo de la PTAR fue de 24 mg/l, con una eficiencia de remoción del 79%.

El filtrado entró en operación a partir del día 71 y durante los primeros muestreos se observó que alcanzó una alta remoción de sólidos suspendidos en algunas ocasiones obteniendo valores de 2 mg/l. A partir del día 190 empezó a disminuir la eficiencia de los filtros, esto se debió a los filtros se empezaron a saturar a pesar de establecer fechas frecuentes para su retrolavado. A pesar del aumento, solamente en el día 277 rebasó los valores establecidos por la normatividad y los demás valores generalmente se mantuvieron constantes entre 15 a 25 mg/l. Estos datos indican que el agua entra dentro de los valores establecidos por la NOM003-SEMARNAT-1997 para el contacto directo del agua, que es una eventualidad que puede suceder en el caso de los usuarios de los sanitarios. La remoción de los sólidos suspendidos totales fue de un 87%, con un promedio de 15mg/l.

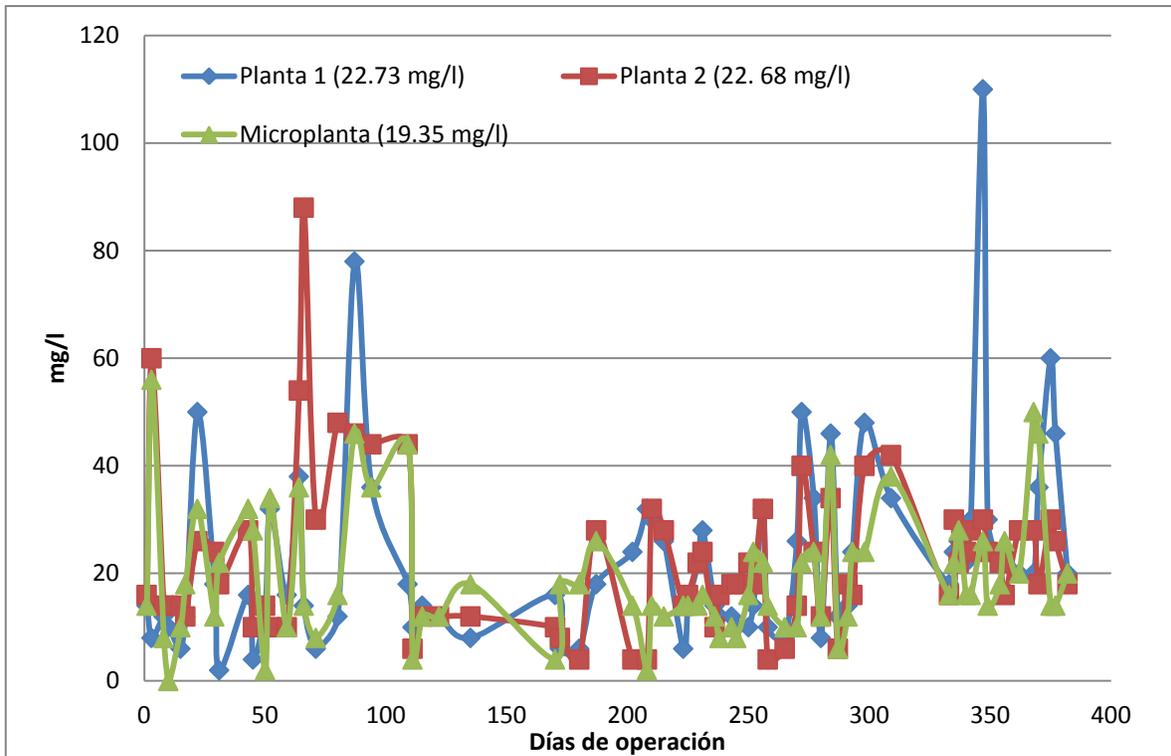


Figura 4.16 Evolución de los Sólidos Suspendedos en las plantas biológicas.

En la figura 4.16 se observa la evolución de las plantas biológicas en cuanto a su descarga de SST. Claramente se aprecia que durante los primeros 50 días de operación las plantas presentaban valores elevados, muy por arriba de la norma, principalmente por la acumulación de lodo en los sedimentadores secundarios. Durante estos días no se podían establecer diferencias entre las tres plantas biológicas, pero conforme se fueron estabilizando se observó que la microplanta presentó una mayor estabilidad en los resultados, y en su mayoría por debajo de la norma.

A la salida de las plantas 1 y 2 se obtuvo una concentración promedio de SST de 23 mg/l con una eficiencia de remoción del 80%, mientras que para la microplanta se alcanzó un promedio de 19 mg/l y 83% de eficiencia. Estos valores comprueban que no existen diferencias significativas estadísticas en las tres plantas (ver tabla 4.1).

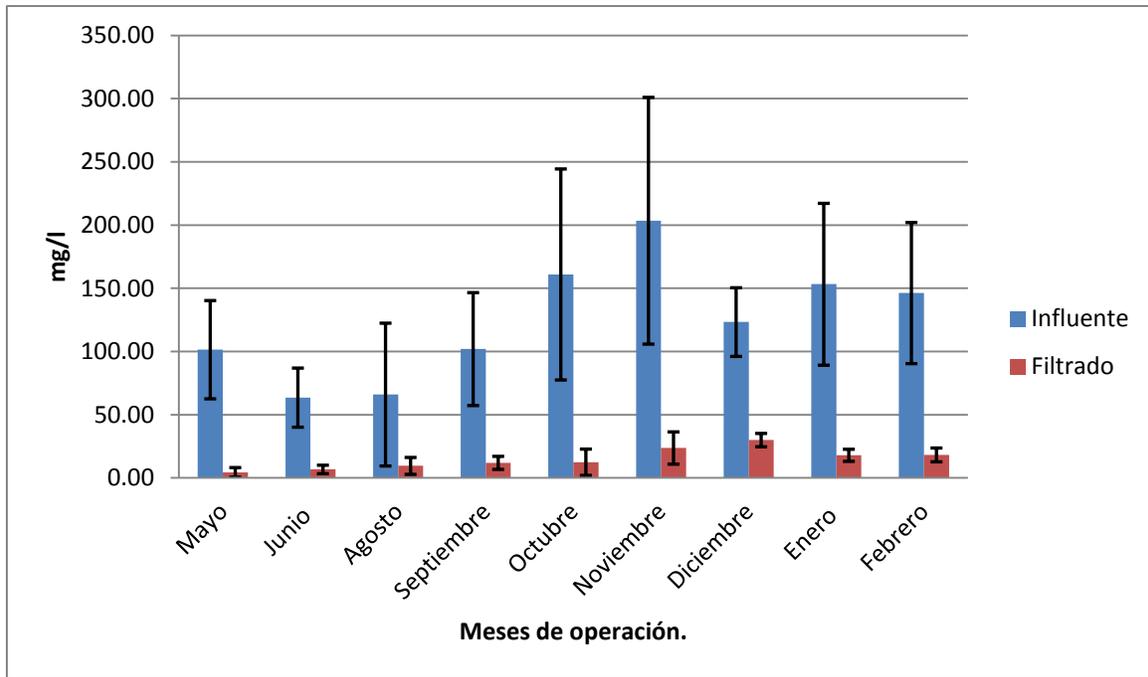


Figura 4.17 Comparación de los sólidos suspendidos totales del influente y el filtrado durante los meses de operación.

En la figura 4.17 se muestra la evolución mensual de los sólidos suspendidos totales en el influente y el filtrado durante la experimentación- Entre los meses de mayo de 2010 a agosto de 2010 se reportaron valores bajos en el influente, de igual manera en el filtrado y se alcanzaron filtrados casi libres de SST. En el periodo de septiembre de 2010 a febrero de 2011, empezaron a incrementarse los sólidos en el influente, principalmente se debió al inicio de la recirculación del agua que provocó una acumulación de material inorgánico en la PTAR. Los SST en el filtrado muestran un incremento en los últimos meses de operación presentados en la figura 4.17, debido a la saturación de los filtros y a una menor eficiencia de filtrado, como ya ha sido mencionado.

#### 4.2.5.2 Relación SSV/SST.

Ésta relación permite identificar la cantidad de materia orgánica presente en el agua. Generalmente, un tratamiento biológico debe tener una alta relación SSV/SST para conseguir una buena remoción de materia orgánica. En caso que se presente un porcentaje bajo, significa, que el agua residual contiene gran

cantidad de materia no biodegradable por un tratamiento biológico. A continuación, en la tabla 4.3 se presentan los promedios de los 3 puntos del sistema: influente, efluente (mezcla de las tres plantas biológicas) y filtrado.

Tabla 4.3 Valores promedio de los SST, SSV y SSV/SST, durante la operación de la PTAR.

| Punto de muestreo | SST (mg/l) | SSV (mg/l) | SSV/SST |
|-------------------|------------|------------|---------|
| <b>Influente</b>  | 115.32     | 92.45      | 0.78    |
| <b>Efluente</b>   | 24.14      | 15.97      | 0.64    |
| <b>Filtrado</b>   | 15.20      | 10.91      | 0.72    |

En la tabla 4.3 se observa los valores promedio de SST y SSV, así como su relación entre ellos. El influente muestra que el agua residual contiene un 78% de compuestos orgánicos y 22% de sales inorgánicas; el origen de estas sales se deben principalmente al aporte del agua potable proveniente de los lavamanos, a desechos (orina, detergentes, jabones, etc.) y durante la recirculación, a los ciclos constantes de agua tratada en donde se va a estar acumulando aún más el material inorgánico proveniente de los desechos. Cuando se empezó a recircular, el colorante también aportó sales, debido a que contiene en su formulación un excipiente de NaCl al 72.5%.

Mientras que para el efluente y filtrado se obtuvo una relación SSV/SST de 0.64 y 0.72, respectivamente.

#### 4.2.5.3 Sólidos disueltos fijos.

Los sólidos disueltos fijos muestran la cantidad de material inorgánico presente en el agua. Para facilitar la lectura de los gráficos, también se dividieron en dos; en la primera gráfica se discutirán los sólidos disueltos fijos para el influente, efluente y filtrado. Mientras que en la segunda gráfica, se analizará la planta 1, planta 2 y microplanta.

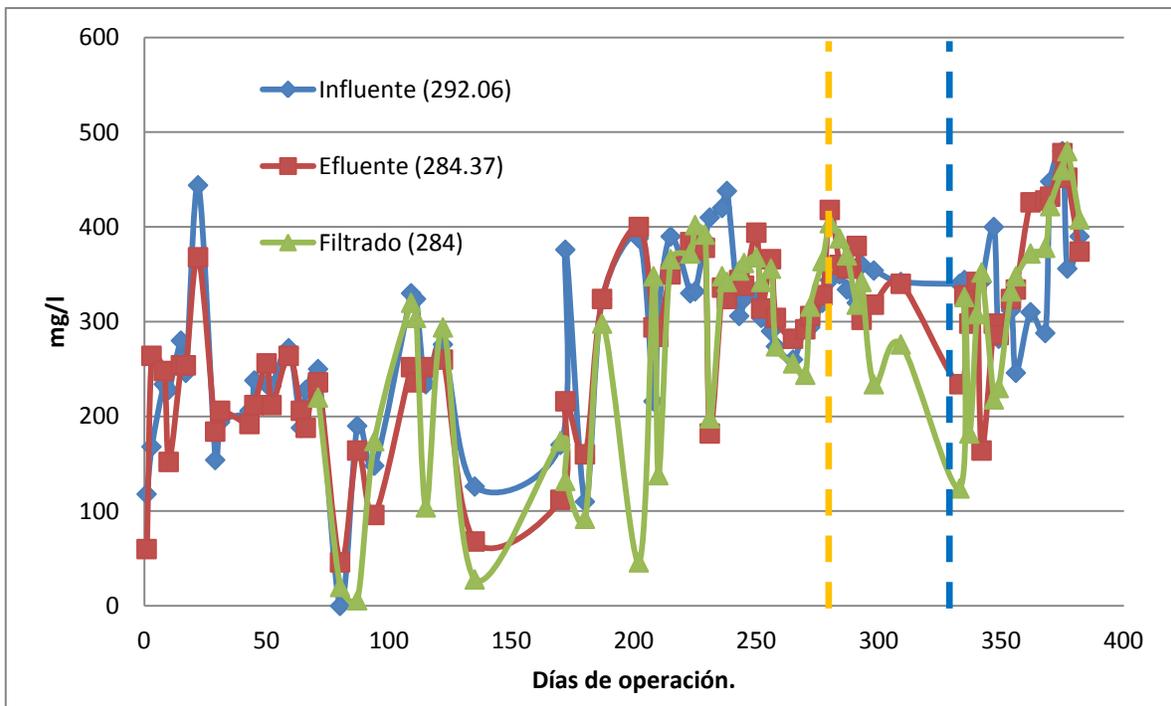


Figura 4.18 Comparación de los sólidos disueltos fijos en el influente, efluente y filtrado.

En la figura 4.18 se muestra la comparación de sólidos disueltos fijos en el influente, efluente y filtrado. Estos valores indican la existencia de material inorgánico en el agua, tanto en la entrada, como en el filtrado. En los tres puntos de muestreo hay una similitud de valores. Obteniendo un valor promedio para el influente de 292 mg/l, para el efluente (mezcla del efluente de plantas biológicas) 284 mg/l, finalmente, para el filtrado se obtuvo un valor de 284 mg/l. Como se observa, si existió una remoción durante el proceso de algún material inorgánico porque disminuye la cantidad de SDF que entraba al sistema, aunque fue mínimo. Los valores muestran que un proceso biológico no es capaz de remover material inorgánico. Con el inicio de la recirculación (línea amarilla), se aprecia un aumento de los SDF, esto es por la acumulación de compuestos inorgánicos provenientes de diferentes orígenes (detergentes, jabones, agua del lavamanos, orina), y al aumentar los ciclos de uso del agua tratada se fueron aumentando estos sólidos debido a que no pueden ser degradados por el tratamiento biológico. Con la incorporación del colorante en el día 340 (línea azul), también contribuyó al

aumento en la concentración de los SDF, debido a que el colorante contiene un exipiente de NaCl del 72.5%.

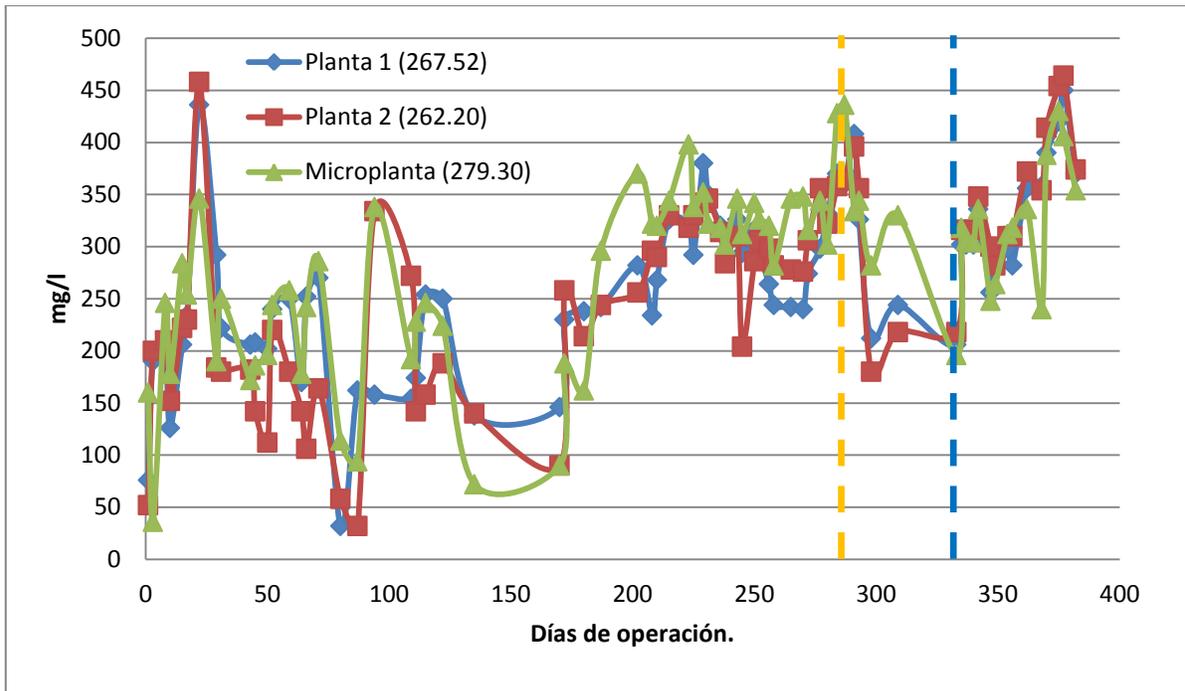


Figura 4.19 Comparación de los sólidos disueltos fijos en las plantas biológicas.

En la figura 4.19 se muestra la comparación de los SDF en las diferentes plantas biológicas. Como en la gráfica anterior, los promedios de las tres plantas son bastante similares. Para la planta 1 se obtuvo un promedio de 268 mg/l, para la planta 2 de 262 mg/l, mientras que para la microplanta fue de 279 mg/l. Esta evolución de los SDF en las plantas biológicas confirman lo mencionado anteriormente; los procesos biológicos no remueven significativamente los compuestos inorgánicos, manteniendo concentraciones de SDF muy similares a la entrada (292 mg/l). El inicio de la recirculación hacia los sanitarios, al igual que la introducción del colorante, provocó el aumento de los SDF. Especialmente, después de la adición del colorante al agua, se nota el incremento de sales inorgánicas no degradables.

#### 4.2.6 Coliformes Fecales.

En la tabla 4.4 se observan los muestreos realizados para detectar la presencia de coliformes fecales, análisis efectuados en un laboratorio externo y acreditado. Como se aprecia, la mayor parte de los días seleccionados para el muestreo no se detectó presencia de coliformes, salvo en dos ocasiones. En el día 251 de operación se detectan coliformes fecales en el segundo tanque de almacenamiento como lo indica la tabla 4.4. Esta detección coincide con la baja de concentración de cloro residual y el aumento de los sólidos suspendidos totales por arriba de la norma en el filtrado.

**Tabla 4.4 Evolución de los coliformes fecales en el filtrado, durante la operación de la PTAR.**

| Fecha      | Días de operación | Coliformes [NMP/100ml] |
|------------|-------------------|------------------------|
| 14/09/2010 | 216               | N/D*                   |
| 15/10/2010 | 247               | N/D*                   |
| 19/10/2010 | 251               | 1.1                    |
| 22/10/2010 | 254               | N/D*                   |
| 29/10/2010 | 260               | N/D*                   |
| 05/11/2010 | 267               | 40                     |
| 10/11/2010 | 272               | N/D*                   |
| 15/11/2010 | 277               | N/D*                   |
| 19/11/2010 | 281               | N/D*                   |
| 26/11/2010 | 288               | N/D*                   |
| 19/01/2011 | 342               | N/D*                   |
| 09/02/2011 | 363               | N/D*                   |
| 25/02/2011 | 379               | N/D*                   |

\* N/D. No Detectado.

La aparición de coliformes fecales, sugiere lo mencionado por Winward *et al.*, (2007): a mayor cantidad de sólidos suspendidos con tamaño de partícula grande,

menor eficiencia de la desinfección. El tener sólidos suspendidos con tamaño de partícula grande ayuda a los microorganismos patógenos a “asociarse” con las partículas para evitar la inactivación de los microorganismos ante el efecto del cloro.

Para el día 267 se observó la mayor cantidad registrada de coliformes fecales en todas las muestras (40 NMP/100ml). Para este día se podría atribuir a un posible crecimiento de biopelícula en la lámpara UV, provocando el arrastre de coliformes al segundo tanque de almacenamiento. En este caso se descarta el exceso de sólidos suspendidos porque en ese día los sólidos suspendidos se encontraban por debajo de la norma.

Aunque en dos muestreos se presentaron coliformes, las cantidades registradas aún se encuentran muy por abajo de la NOM 003-SEMARNAT-1997 (240 NMP/100ml para contacto directo al público y 1000 NMP/100ml para contacto indirecto u ocasional).

#### 4.2.7 Turbidez.

A continuación se muestran los resultados de la turbidez del influente y del filtrado. En la tabla 4.1 se muestran los resultados promedios y desviación estándar de los demás puntos de muestreo.

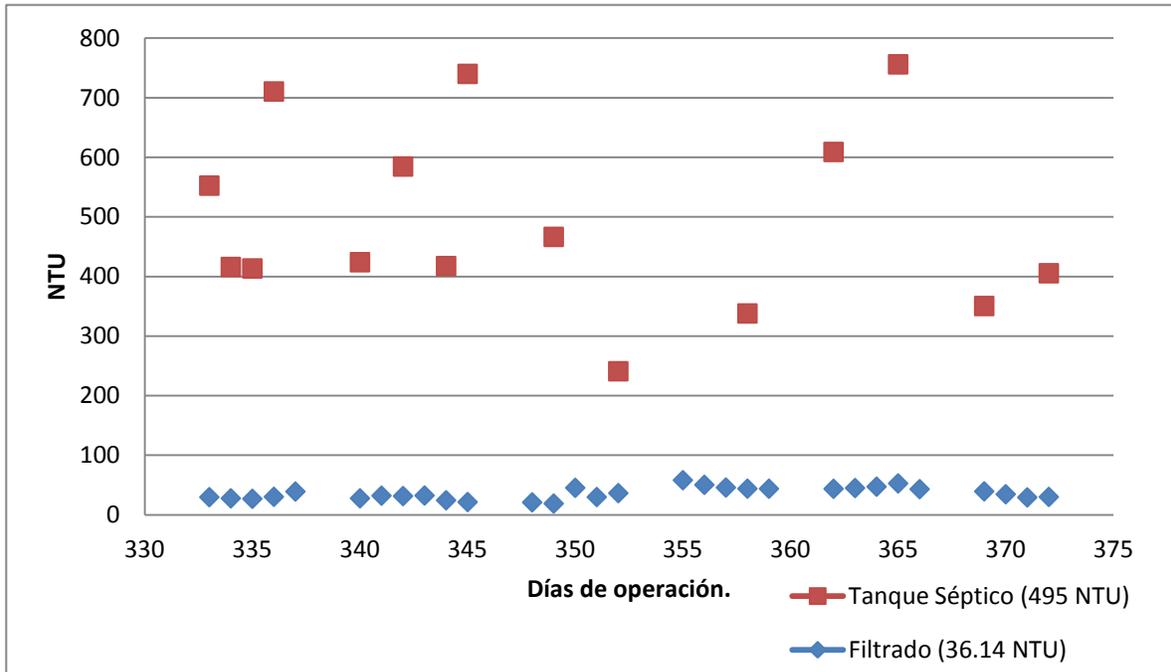


Figura 4.20 Evolución de la turbidez en el tanque séptico y en el filtrado.

La figura 4.20 muestra la evolución de la turbidez en el filtrado comparándola con el agua residual del tanque séptico. Se debe mencionar que este parámetro se consideró evaluar casi al final de la experimentación. Los valores altos de turbidez se deben a la cantidad de partículas con tamaño inferior a  $3\mu\text{m}$ , que principalmente son de tipo coloidal. En el filtrado se obtuvo como promedio de 36.14 NTU, valor que se encuentra elevado con respecto a lo reportado por Ernst *et al.* (2006), para un agua tratada para reúso a sanitarios, recomendando una turbidez en el agua menor a 20 NTU. Otro factor que aumentó la turbidez fue la adición de colorante a partir del día de operación 340 en la línea de agua tratada ya que al pasar por las plantas biológicas este color no se degradaba por completo. Es importante señalar, que la turbidez en el agua tratada fue aumentando conforme se incrementaban los ciclos de recirculación del agua

tratada, llegando a un máximo de 53 NTU (día 365 de operación); una vez llegando a ese máximo, el agua volvió a disminuir pero ya no alcanzó valores por debajo de los 30 NTU.

#### 4.2.8 Conductividad.

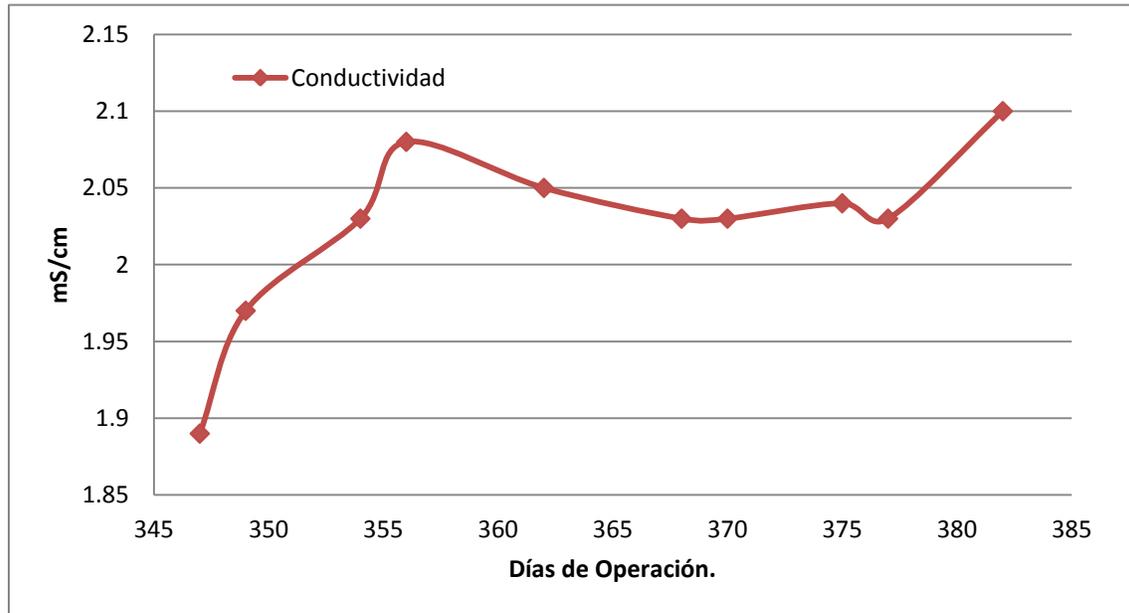


Figura 4.21 Evolución de la conductividad en el filtrado.

En la figura 4.21 se presenta la conductividad durante los últimos días de operación- Para la fecha de inicio de esta medición, el agua recirculada llevaba más de 3 meses de uso. Se observa que entre el día 345 a 355 fue cuando la conductividad empezó a elevarse de manera acelerada, llegando a un máximo de 2.07 mS/cm. Este elevado valor de conductividad coincide con el aumento de los sólidos disueltos fijos lo cual indica la presencia de material inorgánico acumulado en el agua tratada. Durante el día 365 a 380 se mantuvo estable los valores, aproximadamente entre 2.02 a 2.04 mS/cm, para el último día de medición se incrementó el valor a 2.1 mS/cm.

## 4.2.9 Cloro Residual.

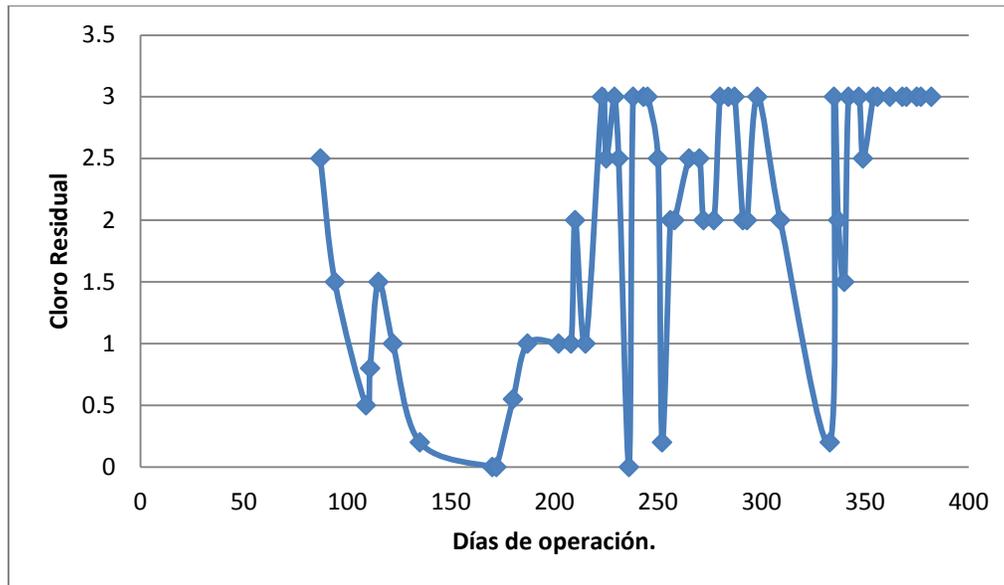


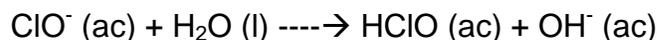
Figura 4.22 Evolución del cloro residual medido en el tanque de agua tratada después de la filtración.

La inyección del cloro no se realizó al inicio de la operación, debido a que no se tenía la bomba dosificadora y es a partir del día 87 que se empezó la dosificación. En la figura 4.22 se observa la evolución del cloro residual durante la operación de la PTAR, se inició la dosis con un buena cantidad de cloro residual resultante (2.5 mg/l), pero conforme fueron avanzando los días empezó a disminuir la concentración de cloro, principalmente cuando se presentó la temporada de calor, hasta alcanzar en el día 170 su mínimo de 0. Ante esta situación, se aumentó la velocidad de dosificación de 25% hasta 40% durante el día. A partir de las 5:00 pm que empezaba a disminuir la temperatura, se disminuía nuevamente la velocidad de dosificación a 25%. Esta operación de la bomba hacía que se consumiera más rápido la solución de hipoclorito de sodio, pero se logró una estabilidad del cloro residual de 1 mg/l. Este problema de pérdida de la concentración de cloro se debe principalmente a las siguientes reacciones (Rayner-Canham, 2000):

El hipoclorito de sodio al estar disuelto en el agua se disocia de la siguiente manera.



El ión hipoclorito entra en contacto con el agua y se hidroliza formando el ácido hipocloroso.



Pero al aumentar la temperatura y/o que la solución entre en contacto con luz brillante, el ácido hipocloroso presenta una reacción de descomposición.



Al tener altas temperaturas en el interior del tanque (aproximadamente 45°C), se realizó esta reacción descomposición, logrando que el ácido hipocloroso perdiera su oxígeno y con ello el poder oxidante, que inactiva a los microorganismos que pudieran estar presentes en el agua.

En los siguientes días de operación se mantuvieron valores entre 2 a 3 mg/L, salvo en tres ocasiones que llegaron a menos de 0.5 mg/L, lo que se debió al exceso de sólidos suspendidos provenientes de las plantas biológicas.

La concentración de sólidos suspendidos afecta la eficiencia en la desinfección (Winward *et al.*, 2007). Para resolver esta situación y mantener un rango de 2 a 3 mg/L en el segundo tanque de almacenamiento fue necesario aumentar la dosificación, justo como se realizó durante la temporada de calor. Con estos ajustes, el agua llegaba a los sanitarios con una cantidad de >1 mg/l de cloro residual, como se recomienda en la literatura para contacto humano; debido a que la concentración del cloro residual justo en el momento de uso debe ser mayor a 0.2 mg/l (Li *et al.*, 2009), además que así se asegura la inactivación total de patógenos, como coliformes y *salmonella*.

### **4.3 Comparación de los resultados obtenidos durante el estudio, con trabajos anteriores.**

En esta sección se realizó una comparación con trabajos anteriores relacionados con la planta de tratamiento. Al realizar este análisis se comprueba el incremento de la eficiencia en algunos parámetros fisicoquímicos (DQOt, DQOs, SST, SSV) durante el periodo de operación y experimentación de febrero de 2010 a marzo 2011.

En este análisis se tomaron en cuenta dos trabajos anteriores: el primero de ellos es una tesis de maestría con el título “Planta integral de tratamiento de aguas residuales y control de olores para reuso de agua en casas habitación” (Márquez, 2004). En este trabajo se comparan los parámetros fisicoquímicos de DQOt, DQOs, SST y las eficiencias de los mismos, únicamente de la microplanta.

El segundo trabajo es un tesis de licenciatura con el título “Análisis comparativo de dos configuraciones de plantas tipo paquete para tratamiento de aguas residuales aplicables a pequeños flujos” (Gómez, 2009) donde se compara también DQOt, DQOs, SST y sus respectivas eficiencias, para la planta 1, planta 2, microplanta y efluente.

#### **4.3.1 Comparación de parámetros fisicoquímicos de la microplanta con trabajos anteriores.**

En el trabajo de Márquez (2004) se plantea un tren de tratamiento compuesto de un tanque séptico, una microplanta y un filtro de lecho de raíces (wetland). El agua residual provenía de una casa habitación, así que al venir principalmente de sanitarios, esta agua residual tiene gran similitud al influente de la PTAR del edificio 12 y 18.

Tabla 4.5 Valores promedio de la microplanta del primer trabajo (Márquez, 2004)\*

|   | Influente* | Microplanta* | Influente** | Microplanta** |
|---|------------|--------------|-------------|---------------|
| <b>DQOt</b><br><b>(mgO<sub>2</sub>/l)</b> | 1103       | 248          | 581         | 127           |
| <b>DQOs</b><br><b>(mgO<sub>2</sub>/l)</b> | 569        | 186          | 302         | 96            |
| <b>SST (mg/l)</b>                         | 562        | 69           | 115         | 19            |
| <b>SSV (mg/l)</b>                         | 464        | 55           | 92          | 12            |
| <b>% Remoción</b><br><b>DQOt</b>          | --         | 70           | --          | 77            |
| <b>% Remoción</b><br><b>DQOs</b>          | --         | 68           | --          | 69            |
| <b>% Remoción</b><br><b>SST</b>           | --         | 50           | --          | 83            |

\*Datos obtenidos por Márquez (2004) \*\*Datos obtenidos durante el presente estudio

En la tabla 4.5 se muestran los datos promedio del estudio realizado por Márquez (2004) y los datos obtenidos en este estudio de la microplanta. El agua residual de Márquez contiene una alta concentración de DQO y de sólidos, mayor al agua residual proveniente del edificio 12 y 18. Lo obtenido por Márquez para la DQO total (248 mgO<sub>2</sub>/l) en la microplanta es proporcional a lo obtenido en este estudio (127 mgO<sub>2</sub>/l) tomando en cuenta la concentración inicial del influente. La similitud de los resultados se puede comprobar en el porcentaje de remoción de DQO total, obteniendo valores de 70% y 77% respectivamente. Para la DQO soluble también se presentan valores bastante similares en su porcentaje de remoción, de 68% para Márquez y 69% en este estudio. Por su parte, los SST, para el estudio realizado Márquez (2004) se logra remover solo un 50% del total de los SST; para este estudio se removi6 83%. Esta diferencia de remoci6n se debe a que el agua residual de Márquez (2004) contiene una mayor cantidad de s6lidos suspendidos.

#### 4.3.2 Comparación de parámetros fisicoquímicos de la PTAR con trabajos anteriores.

En este trabajo se realizó un estudio de la PTAR del edificio 12 y 18 durante la estabilización de las plantas biológicas (planta 1, planta 2 y microplanta). La tesis realizada por Gómez (2009) determinó que planta biológica presenta mejor eficiencia para la remoción de contaminantes. En este trabajo solamente se compararon las plantas biológicas, ya que en ese entonces los filtros aún no se encontraban operando.

Tabla 4.6 Valores promedio de la PTAR del segundo trabajo (Gómez, 2009)\*

|                                      | Inf* | P1* | P2* | Micro* | Efl* | Inf** | P1** | P2** | Micro** | Efl** |
|--------------------------------------|------|-----|-----|--------|------|-------|------|------|---------|-------|
| <b>DQOt</b><br>(mgO <sub>2</sub> /l) | 689  | 218 | 272 | 242    | 219  | 581   | 154  | 154  | 127     | 146   |
| <b>DQOs</b><br>(mgO <sub>2</sub> /l) | 312  | 130 | 146 | 174    | 142  | 302   | 106  | 105  | 96      | 97    |
| <b>SST</b><br>(mg/l)                 | 460  | 70  | 124 | 58     | 59   | 115   | 23   | 23   | 19      | 24    |
| <b>SSV</b><br>(mg/l)                 | 411  | 58  | 116 | 73     | 52   | 92    | 16   | 15   | 12      | 16    |
| <b>%DQOt</b>                         | --   | 67  | 58  | 64     | 67   | --    | 73   | 73   | 77      | 75    |
| <b>% DQOs</b>                        | --   | 58  | 52  | 44     | 54   | --    | 65   | 65   | 69      | 67    |
| <b>% SST</b>                         | --   | 67  | 55  | 77     | 74   | --    | 80   | 80   | 83      | 79    |

Inf= Influyente, P1=Planta 1, P2= Planta 2, Micro= Microplanta, Efl= Efluente (mezcla). \* Datos obtenidos por Gómez (2009) \*\*Datos obtenidos durante el presente estudio.

En la tabla 4.6 se muestran los valores promedio reportados por Gómez (2009). El agua residual entró con una DQOt de 689mgO<sub>2</sub>/l, mientras que en SST 460 mg/l. Los valores de la DQOt y DQOs reportados por Gómez (2009) en el influente son muy similares a los reportados en este trabajo; en donde existió diferencia fue en los SST.

Para la planta 1 y 2, en el estudio de Gómez (2009), se observan valores elevados en sus parámetros fisicoquímicos de salida, lo cual indica que en ese tiempo las plantas paquete aún se encontraban en adaptación y por ello aún no alcanzaban su periodo de estabilización. Mientras que en el presente estudio, los valores muestran que para las plantas paquete, sus periodos de estabilización eran menos

prolongados y por ende se presentó una disminución en la concentración de los parámetros fisicoquímicos. Es importante mencionar que la planta biológica que más trabajo costó estabilizar en este estudio fue la planta 2, coincidiendo con lo reportado por Gómez (2009).

Para la microplanta se observa una alta concentración de DQOt, DQOs y SST. En el estudio de Gómez (2009), se instaló la microplanta en la PTAR y es común para las plantas biológicas recién instaladas que necesiten un periodo para alcanzar su máxima eficiencia. Se observa que la microplanta durante el 2008 (año en el que se empezó a operar la microplanta) obtuvo un porcentaje de remoción de DQOt, DQOs y SST de 64%, 44% y 77%, respectivamente. Mientras que durante el periodo de 2010-2011, se alcanzó una eficiencia de DQOt, DQOs y SST de 77%, 69% y 83%, respectivamente. A pesar que la microplanta empezaba a adaptarse al influente proveniente del tanque séptico en el 2008, también fue la planta biológica que alcanzó mayor remoción de SST. Los SSV también alcanzaron remociones altas en el estudio de Gómez (2009), con excepción de la planta 1, mientras que en el trabajo realizado (2010-2011), se observa que la remoción de SSV fue alta, especialmente en la microplanta.

#### 4.4 Estudio económico.

Se realizó una estimación económica de la PTAR con la finalidad de conocer el costo del metro cúbico de agua tratada, así como también determinar la rentabilidad del proyecto a lo largo del tiempo.

Para poder calcular el costo del agua tratada se midieron los caudales a la salida de la PTAR, tras realizar las mediciones se calculó un promedio mensual de  $3\text{m}^3/\text{día}$  aproximadamente.

##### 4.4.1 Inversión Total.

En la tabla 4.7 se muestra el costo total de los equipos empleados en el proceso, los accesorios y los equipos fueron cotizados directamente con los proveedores. Mientras que para el costo de construcción (incluye la obra civil y obra eléctrica), se propuso un porcentaje del 30%, de acuerdo del costo de los equipos; dentro de este porcentaje se incluye los siguiente conceptos para la obra civil: limpieza y deshierbe del terreno (preliminares), trazo y nivelación, excavación, construcción de firme de concreto armado  $f'200\text{kg}/\text{cm}^2$ , muros de contención de concreto armado (se especifica la misma resistencia del concreto que la losa de sedimentación), montaje e instalación de equipo, en lo que refiere a la obra eléctrica se consideró: tirado de línea para alimentación eléctrica para la PTAR, de igual manera se propuso un porcentaje de 15% al costo por la ingeniería, en este porcentaje se considera la ingeniería la ingeniería básica y de detalle.

Tabla 4.7 Costo de equipo para la PTAR.

| Cantidad     | Equipo  | Precio Unitario | Precio Total        |
|--------------|---|-----------------|---------------------|
| 2            | Bomba sumergible 0.5HP                              | \$1,525.00      | \$3,050.00          |
| 3            | Tanque 5000L  | \$9,415.00      | \$28,245.00         |
| 2            | Tanque 450L   | \$999.00        | \$1,998.00          |
| 2            | Plantas aerobias (incluyen los compresores de 2 hp) | \$40,000.00     | \$80,000.00         |
| 1            | Microplanta   | \$25,000.00     | \$25,000.00         |
| 1            | Tanque 100L   | \$270.00        | \$270.00            |
| 1            | Tanque 20L  | \$20.00         | \$20.00             |
| 2            | Bomba Hanna   | \$4,204.00      | \$8,408.00          |
| 1            | Electrobomba de una fase                            | \$763.00        | \$763.00            |
| 1            | Tanque precargado de acero INOX                     | \$250.00        | \$250.00            |
| 2            | Filtros   | \$15,000.00     | \$30,000.00         |
| 1            | Lámpara UV  | \$18,902.00     | \$18,902.00         |
| 1            | Tanque Nalgene 40L                                  | \$500.00        | \$500.00            |
| 2            | Bomba centrífuga 2 hp                               | \$1,475.00      | \$2,950.00          |
| 1            | Hidroneumático                                      | \$8,858.00      | \$8,858.00          |
| 3            | Compresor 1 hp                                      | \$2945.00       | \$8835.00           |
| 1            | Sensor  | \$1,900.00      | \$1,900.00          |
| 10           | Bombas sumergibles 4W                               | \$41.00         | \$410.00            |
| <b>Total</b> |   |                 | <b>\$220,359.00</b> |

En la tabla 4.8 se muestran los costos totales de la inversión en donde se incluye el costo de los equipos, la ingeniería, el costo de construcción, accesorios y otros materiales.

Tabla 4.8 Costo total de la inversión para la PTAR.

|  |                     |
|--|---------------------|
| <b>Costo de equipo</b>   | <b>\$220,359.00</b> |
| <b>Accesorios</b>  | <b>\$15,973.50</b>  |
| <b>Obra civil, obra eléctrica e instalación de los equipos (30%)</b> | <b>\$66,107.70</b>  |
| <b>Ingeniería básica y de detalle (15%)</b>                          | <b>\$33,053.85</b>  |
| <b>Inversión total</b>   | <b>\$335,494.05</b> |

#### 4.4.2 Costos de operación.

Para los costos de operación se dividieron en dos subgrupos, los costos fijos y los costos variables. En los costos fijos se incluyeron los costos por mantenimiento, mano de obra y los análisis de laboratorio. Estos costos se consideraron como fijos, debido a que son necesarios para la operación de la planta y generalmente no presentan variaciones. Para la estimación de los costos fijos se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- El mantenimiento se realiza dos veces al año y es realizado por los mismos operadores de la PTAR, aunque en algunas ocasiones es necesario realizar mantenimiento en equipos que requieren atención especializada. Para este tipo de situaciones una empresa externa se hace cargo.
- En la mano de obra se tomó en cuenta un técnico especialista (Conalep) de tiempo parcial con un sueldo mensual de \$2,000.00
- Los análisis de laboratorio que se llevan a un laboratorio acreditado para hacer algunas pruebas como  $\text{DBO}_5$  y coliformes totales. Su costo a lo largo del tiempo no presenta cambios significativos y fueron tomados directamente de la factura de los mismos.

Para los costos variables se incluyeron los costos de la materia prima, reactivos del laboratorio, servicios auxiliares. Estos costos se incluyeron en esta sección debido que a lo largo del año van a modificarse de acuerdo a la demanda o al incremento de precios en el mercado. También para la estimación de los costos variables se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Consumo de agentes químicos para el proceso de desinfección (hipoclorito de sodio). El precio por hipoclorito de sodio se calculó con base a las cotizaciones proporcionadas por el proveedor. Otro agente químico fue el colorante azul, utilizado en la pigmentación del agua tratada que es recirculada. Estos dos productos se consideran la única materia ocupada en el proceso.
- Los reactivos de laboratorio.
- La energía eléctrica que se ocupa para la operación de la PTAR, específicamente para los compresores de las plantas biológicas, la luz UV, las bombas, los filtros y la instrumentación. El valor de la energía eléctrica se obtuvo a partir de las tarifas de CFE.

Tabla 4.9 Costos de operación anual para la PTAR.

| <b>Costos de operación</b>                   |                    |
|--|--------------------|
| <b>A. Costos variables</b>                   |                    |
| <b>1. Materias primas</b>                    | \$2,905.40         |
| <b>2. Energía eléctrica</b>                  | \$10,000.00        |
| <b>3. Reactivos de laboratorio</b>           | \$2,000.00         |
| <b>Total de costos variables</b>             | <b>\$14,905.40</b> |
| <b>B. Costos fijos</b>                       |                    |
| <b>1. Mano de obra</b>                       | \$24,000.00        |
| <b>2. Mantenimiento</b>                      | \$3,000.00         |
| <b>3. Análisis de laboratorio</b>            | \$5,020.00         |
| <b>Total de costos fijos</b>                 | <b>\$32,020.00</b> |
| <b>Total de costos de producción (A + B)</b> | <b>\$46,925.40</b> |

#### 4.4.3 Costo de agua tratada.

Una vez conociendo el caudal de la PTAR ( $3\text{m}^3$ ) se estimó la producción de agua tratada tomando en cuenta las siguientes consideraciones (Cid, 2007).

- Se considera que la producción de agua tratada va a ser durante los 365 días del año.

$$\text{Producción de agua al año} = \frac{3\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = \frac{1095\text{m}^3}{\text{año}}$$

- El cargo capital por depreciación se calcula para una proyección del sistema a 15 años.

$$\text{Cargo de Capital} = \frac{\text{Inversión total}}{\text{número de años}} = \frac{\$335,494.05}{15 \text{ años}} = \$22,366.27$$

El costo total de producción se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo total de producción} = \text{costo de operación} + \text{cargo de capital}$$

$$\text{Costo total de producción} = \$46,925.40 + \$22,366.27 = \$69,291.67$$

Finalmente, el costo por metro cúbico de agua tratada para la PTAR se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Costo del agua} = \frac{\text{Costo total de producción}}{\text{Producción de agua al año}}$$

$$\text{Costo del agua} = \frac{\$69,291.67/\text{año}}{1095 \text{ m}^3/\text{año}} = \frac{\$63.28}{\text{m}^3}$$

El costo por metro cúbico de agua tratada resulta ser caro si se compara con el metro cúbico de plantas de tratamiento que tienen un mayor caudal, porque a mayor caudal el costo por tratar el agua disminuye.

#### 4.4.4 Viabilidad económica.

Una vez que se conoce el costo por metro cúbico ( $\$63.28/m^3$ ) de agua tratada, es necesario saber si este proyecto es viable o no de acuerdo al periodo establecido para la recuperación de la inversión inicial (compra de equipos, accesorios, ingeniería básica, ingeniería de detalle, etc.), para esto es necesario conocer el estado de resultados, la depreciación de los equipos y el flujo de efectivo.

Ciudad Universitaria cuenta con tres pozos propios para su suministro a todas sus dependencias, así que no se cobran derechos por suministro de agua potable. El Instituto de Ingeniería se suministra de agua potable a partir de un pozo ubicado en la facultad de Química, llamado “pozo Química”. Ante la ausencia de una tarifa de suministro dentro de Ciudad Universitaria, se tomó como tarifa la del Sistema de Aguas de la Ciudad de México de acuerdo al Código Fiscal del Distrito Federal, 2010, capítulo IX, sección primera; en donde se describe los derechos por el suministro de agua y sus respectivas tarifas. En este código, se establece el pago por el derecho de suministro de agua se hará conforme al volumen consumido en el bimestre. De acuerdo al consumo bimestral, se tienen diferentes rangos de cuota, para más detalles véase la tabla 4.10. La PTAR produce  $180m^3$  bimestrales, lo cual significa que esa cantidad se genera bimestralmente por los edificios 12 y 18 del Instituto de Ingeniería. Al tener este consumo, y en ausencia de la PTAR, la tarifa a pagar entra en el rango de 90 a  $120 m^3$  cuya cuota es  $\$2,320.00$ , pero se tiene un excedente de  $60m^3$ . En este caso, por cada metro cúbico extra se paga  $\$40.50$ , obteniendo una cuota adicional de  $\$2,430.00$ . Finalmente, la cuota a pagar bimestral sería de  $\$4,750.00$  y anual de  $\$28,500$  pesos. Tal factura representa una cuota a pagar por metro cúbico de  $\$26.33$  pesos, lo cual representa un ahorro en el volumen diario que se utiliza para sanitarios y mingitorios.

Tabla 4.10 Tarifa bimestral de agua potable (Código Fiscal del Distrito Federal, 2010).

| Consumo en litros     |                 | Tarifa       |  |
|-----------------------|-----------------|--------------|--|
| Límite inferior       | Límite superior | Cuota Mínima | Cuota Adicional por cada 1,000 litros excedentes al límite inferior. |
| 0                     | 15,000          | \$345.00     |  |
| <b>MAYOR A 15,000</b> | 20,000          | \$345.00     | \$23.00  |
| <b>MAYOR A 20,000</b> | 30,000          | \$460.00     | \$23.00  |
| <b>MAYOR A 30,000</b> | 40,000          | \$690.00     | \$23.00  |
| <b>MAYOR A 40,000</b> | 50,000          | \$920.00     | \$23.00  |
| <b>MAYOR A 50,000</b> | 70,000          | \$1,150.00   | \$28.00  |
| <b>MAYOR A 70,000</b> | 90,000          | \$1,710.00   | \$30.50  |
| <b>MAYOR A 90,000</b> | 120,000         | \$2,320.00   | \$40.50  |

La depreciación se define como la pérdida de valor contable que sufren los activos fijos por el uso a que se les somete y su función productora de renta. En la medida en que avance el tiempo de servicio decrece el valor contable de dichos activos.

Para la depreciación de los equipos en la PTAR se propuso una depreciación anual del 20% en equipos electromecánicos (bombas, hidroneumático), mientras que para el resto de los equipos se depreció al 6.6% anual. Para el año 5 se tendrán amortizados los equipos electromecánicos. A partir del año 6 el único aporte de la depreciación será de los demás equipos (plantas biológicas, luz UV, entre otros) debido a que estos se depreciarán en 15 años. La depreciación de cada equipo se puede apreciar en la sección de los anexos, tabla A3.1.

El estado de resultados indica el ahorro neto que puede generar la planta de tratamiento al año. Los costos variables al estar en función del mercado, no se

mantienen iguales a lo largo del tiempo (Bu, 2006). El incremento de los costos variables se debe a la inflación, que se entiende como el incremento generalizado de los precios de bienes y servicios con relación a una moneda durante un período de tiempo. En este trabajo se planteó una inflación variable, con incrementos del 0.01% anual. En el año 0 se inició con una inflación anual del 5%. En la tabla A3.2 se muestra el estado de resultados de la PTAR.

Finalmente, el flujo de efectivo indica cómo se va recuperando la inversión inicial, hasta llegar a un punto donde se obtiene un ahorro significativo de agua potable. Inicialmente, se tiene un año 0, en este año solo se considera la inversión inicial (incluye el costo de equipos, accesorios, instalación, mano de obra, etc.) y el capital de trabajo, que incluye la mano de obra y los reactivos utilizados para la producción de un lote de agua tratada. Para el año 0 se tendrá un flujo de efectivo negativo. Conforme van avanzando los años, ya se puede considerar el ahorro neto después de impuestos, la depreciación y el rescate a la inversión, ayudan para empezar a generar activos, es decir el ahorro que se tendrá por reusar el agua.

Este análisis muestra una recuperación del capital a los 14 años, lo cual económicamente no es viable, pero al ser un proyecto de costo-beneficio si se considera atractivo ya que contribuye a lograr que el Instituto de Ingeniería reduzca su consumo de agua potable en un 10.77% al bimestre ya que el consumo de agua en el Instituto de Ingeniería es de 1669.94 m<sup>3</sup> al bimestre (PUMAGUA, 2011). El ahorro de agua potable no solamente beneficiará al Instituto de Ingeniería sino que también ayudará a que el pozo de donde se extrae agua potable para el Instituto, alargue su tiempo de vida útil. En la tabla A3.3 de los anexos se observa el flujo de efectivo en un periodo de 8 años.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones.

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. Las plantas biológicas son muy sensibles ante cualquier perturbación que se presente, ya sea por alguna falla mecánica para la alimentación de aire, incremento de los lodos, o rearranque. Generalmente, las plantas se estabilizan después de dos semanas. Se logró un porcentaje de remoción de DQO en la microplanta del 77% y de 73% para las plantas 1 y 2. La remoción de SST fue de 83% en la microplanta y de 80% para las plantas 1 y 2.
2. Durante el periodo de estudio, el efluente tratado de la PTAR cumplió los límites máximos permisibles que indica la NOM-003-SEMARNAT-1997, ya que se alcanzaron valores promedio por debajo de los establecidos para DBO<sub>5</sub> de 7 mgO<sub>2</sub>/L, SST de 15 mg/L, y ausencia de coliformes fecales.
3. El agua tratada cumple con la calidad necesaria para recircularse a los sanitarios durante varios ciclos. Sin embargo, se recomienda renovarla por agua potable cada seis meses debido al incremento de los parámetros fisicoquímicos (turbidez, conductividad, SDF y DQO), que se consideran relativamente altos para el agua tratada que se reutiliza a los sanitarios, de acuerdo a normas o decretos de reuso en otros países.
4. Del estudio económico realizado, el costo por metro cúbico de agua tratada es de \$63.28, valor que resulta elevado por lo cual no es competitivo si se compara con el precio por metro cúbico de agua potable en el DF (\$26.33) que se aplicaría para el nivel de consumo de agua potable que tienen los edificios 12 y 18. Al realizar la viabilidad económica el proyecto resultó ser económicamente no viable. Sin embargo, si se desea implementar este sistema en un edificio habitacional o de oficinas, resulta ser muy atractivo por el costo-beneficio en cuanto al ahorro de agua potable.

### *Recomendaciones.*

- Estabilización de la PTAR.

Para evitar el periodo de re-estabilización de las plantas biológicas justo después de las vacaciones, una propuesta sería recircular el efluente de las plantas biológicas hacia la fosa séptica en los días de asueto, para que con ello se evite que las plantas trabajen en ausencia de alimentación y de esta manera disminuir el tiempo del re arranque.

- Sistema de bombeo del agua residual.

Implementar un dispositivo más eficiente para las bombas sumergibles del tanque séptico, para evitar el taponamiento del impulsor de las bombas sumergibles y así se disminuya el flujo de alimentación a las plantas biológicas.

- Automatización de la PTAR.

Es viable automatizar la PTAR instalando válvulas automáticas, que regulen la filtración, así como también el retrolavado de los mismos filtros. También se puede instalar un equipo que mida el oxígeno disuelto en los tanques de aireación de cada planta, para tener el conocimiento en tiempo real de la cantidad de oxígeno que se le está suministrando a la PTAR y si es necesario regular el flujo de aire con válvulas automatizadas. Otras alternativas es instalar en línea medidores de cloro residual, turbidez y conductividad.

- Purga de lodos.

En condiciones normales se puede purgar lodos de las plantas biológicas una vez cada dos semanas, pero cuando exista una falla de compresor o sobreproducción de lodos, se debe de estar purgando constantemente (de una a tres veces por semana), para evitar la disminución del poder desinfectante del hipoclorito, saturación de los filtros y la formación de biopelícula en la lámpara de la luz UV.

- Retrolavado.

Para que los filtros tengan una mayor eficiencia, se propone realizar el retrolavado con agua potable, en vez de tomar el agua tratada del segundo tanque de almacenamiento debido a que existe presencia de color, por al menos 1 vez por semana.

- Dosis de hipoclorito de sodio.

Durante la temporada de calor (marzo a junio), es necesario aumentar la dosificación de hipoclorito de sodio hacia el primer tanque de almacenamiento, debido a que el calor provoca reacciones de descomposición en el hipoclorito de sodio, logrando que se pierda su poder oxidante, causando una baja concentración de cloro residual cuando el agua se descarga de los sanitarios y mingitorios del edificio 12 y 18.

## 6. Referencias citadas.

Bu Coss, (2006), *Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión*, Editorial Limusa, 2da Edición, México, 73-81, 211-227

Chaillou K., Gérente C., Andrès Y., (2010), *Bathroom Greywater Characterization and Potential Treatments for Reuse*, *Water Air Soil Pollut*, 215, 31-42.

Cid Dulce M., (2007), *Tratamiento de agua residual municipal mediante un biorreactor anaerobio de membrana a escala piloto*, Tesis de Maestría (Maestría en Ingeniería Ambiental), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Código Fiscal del Distrito Federal, (2010), Artículo IX Derechos por la prestación de servicios, sección primera De los derechos por los suministros de agua, [http://www.sacm.df.gob.mx:8080/c/document\\_library/get\\_file?uuid=61e4fded-bf9a-44bd-96f1-57af31511f80&groupId=10259](http://www.sacm.df.gob.mx:8080/c/document_library/get_file?uuid=61e4fded-bf9a-44bd-96f1-57af31511f80&groupId=10259). Fecha de consulta: 11-11-11.

CONAGUA, (2010), Estadísticas del agua en México, marzo 2010, Capítulo 3, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-10EAM2010.pdf>. Fecha de consulta: 29-06-11.

Eriksson E., (2002), *Potential and problems related to reuse of water in households*, Ph.D. Thesis, Environment and Resources DTU, Technical University of Denmark, ISBN 87-89220-69-2.

Ferrer, C., Bécares, E., Sangüesa, I., (2007), *Wastewater characteristics and performance analysis in small activated-sludge treatment plants in the Castellón province (Spain)*, Memorias del II Congreso Internacional "Smallwat07", noviembre 11 a noviembre 15, Sevilla, España, 1-6.

García, Erick I., (2009), *Análisis de potencialidad de reúso de agua residual en el edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez, Gerardo, (2009), *Análisis comparativo de dos configuraciones de plantas tipo paquete para el tratamiento de aguas residuales aplicables a pequeños flujos*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Henry, G., Heinke, G. W., (1999), *Ingeniería Ambiental*, 2da Edición, Pearson Education, México, 440-450.

Henze, M., Harremoës, P., Cour Jansen, J., Arvin, E., (2002), *Wastewater treatment: biological and chemical processes*, 3<sup>rd</sup> Edition, Springer, United States of America, 27-40, 116-130.

Jefferson B., Laine A., Parsons S., Stephenson T., Judd S., (1999), *Technologies for domestic wastewater recycling*, 1 (4), 285-292.

Jiménez, B.E., (2002), *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*, Editorial Limusa, México, 124-135.

Jördening, H., Winter, J., (2005), *Environmental biotechnology: concepts and applications*, Wiley-VCH, Germany, 7-8, 79-106.

Li, F., Wichmann K., Otterpohl, R., (2009), *Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses*, Science of the Total Environment, 407, 3439-3449.

Mackenzie L., Masten S., (2005), *Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 1ra Edición, Editorial McGraw-Hill, México, 410-435.

Madigan M., Martinko J., Parker J., (2006), *Biología de los Microorganismos*, Décima Edición, Editorial Pearson, Madrid, 692-693.

Marchaim, U., (1992), *Biogas processes for sustainable development*, Food and Agriculture Organization, United States of America, 51-60.

Márquez, Juan Francisco, (2004), *Planta integral de aguas residuales y control de olores para reuso de agua en casas habitación*, Tesis de Maestría (Maestría en Ingeniería Ambiental), Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Márquez, J.F, Bautista, R.M., Morgan-Sagastume, J.M., Noyola, A., (1998), *Puesta en marcha de una planta de tratamiento in situ de aguas residuales para casa habitación*, Revista Vector de la Ingeniería Civil, Número 11, marzo, 1998, 26-31.

Metcalf & Eddy, Inc., (1991), *Wastewater Engineering Collection Treatment Disposal*, McGraw-Hill Book Company, 3th edition, United States of America.

Norma Oficial Mexicana Nom-001-SEMARNAT-1996, establece los *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*, Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003.

Norma Oficial Mexicana Nom-002-SEMARNAT-1996, establece los *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal*, Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003.

Norma Oficial Mexicana Nom-003-SEMARNAT-1997, establece los *Límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas que se reusen en servicios públicos*, Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la Federación, 23 de abril de 2003.

PUMAGUA, (2011), Consumo de Agua por Dependencias, diciembre 2011, [http://www.pumagua.unam.mx/balance\\_consumo.html](http://www.pumagua.unam.mx/balance_consumo.html). Fecha de consulta: 03-01-12.

Ramahlo, R.S., (1991), *Tratamiento de Aguas Residuales*, Editorial Reverté, España.

Rayner-Canham G., (2000), *Química Inorgánica Descriptiva*, Segunda Edición, Editorial Pearson, México, 396-398.

Salvato J.A., Nemerrow N.L., Agardy F. J., (2003), *Environmental Engineering*, 5<sup>th</sup> Edition, John Wiley and Sons, United States of America, 732-734.

Sancier Aries, Newton Robert D., (1980), *Chemical Engineering Cost Estimation*, 3th Edition, Mc Graw Hill, United States of America.

*Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*, (1998), 20<sup>th</sup> Edition, the Joint Editorial Board, United States of America.

Tchobanoglous G., Crites R., (2000), *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones*, Editorial McGraw-Hill, México, 2-9, 21-74, 300-313, 345-382.

Waites M.J., Morgan N.L., Rockey J.S., Higton G., (2005). *Industrial microbiology: An introduction*, 3th Edition, Wiley-Blackwell, United States of America, 229-246.

WEF, (1995), *Odor Control in Wastewater Treatment Plants*, WEF Manual of Practice No. 22, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 82, Water Environment Federation, Alexandria, VA.

Winward G., Avery L., Stephenson T., Jefferson B., (2008), *Chlorine disinfection of grey water for reuse: Effect of organics and particles*, Water Reseach, 42, 483-491.

## Anexo I.

En el Anexo I se muestran los valores promedios del periodo 1 (170-215 días de operación) y el periodo 2 (293-375 días de operación) para la DQO total y DQO soluble.

Tabla A1.1 DQO promedio del primer periodo (170-215 días de operación).

| Periodo 1       |                   | Planta 1                        |                                   | Planta 2                        |                                   |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Fecha           | Días de Operación | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) |
| 02/08/2010      | 170               | 52.94                           | 44.12                             | 35.29                           | 17.65                             |
| 04/08/2010      | 172               | 75.00                           | 50.00                             | 66.67                           | 50.00                             |
| 09/08/2010      | 180               | 196.88                          | 159.38                            | 206.25                          | 178.13                            |
| 16/08/2010      | 187               | 211.32                          | 105.66                            | 377.36                          | 22.64                             |
| 31/08/2010      | 202               | 123.00                          | 90.00                             | 263.01                          | 115.07                            |
| 06/09/2010      | 208               | 303.80                          | 167.09                            | 258.23                          | 98.73                             |
| 08/09/2010      | 210               | 271.70                          | 128.30                            | 339.62                          | 135.85                            |
| 13/09/2010      | 215               | 379.75                          | 258.23                            | 311.39                          | 227.85                            |
| <b>Promedio</b> |                   | <b>201.80</b>                   | <b>125.35</b>                     | <b>232.23</b>                   | <b>105.74</b>                     |

| Periodo 1       |                   | Microplanta                     |                                   | Filtrado                        |                                   |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Fecha           | Días de Operación | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) |
| 02/08/2010      | 170               | 123.53                          | 26.47                             | 97.06                           | 52.94                             |
| 04/08/2010      | 172               | 300.00                          | 183.33                            | 150.00                          | 108.33                            |
| 09/08/2010      | 180               | 281.25                          | 234.38                            | 225.00                          | 196.88                            |
| 16/08/2010      | 187               | 226.42                          | 150.94                            | 279.25                          | 226.42                            |
| 31/08/2010      | 202               | 65.75                           | 32.88                             | 131.51                          | 16.44                             |
| 06/09/2010      | 208               | 151.90                          | 121.52                            | 167.09                          | 83.54                             |
| 08/09/2010      | 210               | 120.75                          | 128.30                            | 166.04                          | 105.66                            |
| 13/09/2010      | 215               | 151.90                          | 144.30                            | 167.09                          | 174.68                            |
| <b>Promedio</b> |                   | <b>177.69</b>                   | <b>127.77</b>                     | <b>172.88</b>                   | <b>120.61</b>                     |

Tabla A1.2 DQO promedio del segundo periodo (293-375 días de operación).

| Periodo 2       |                   | Planta 1                        |                                   | Planta 2                        |                                   |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Fecha           | Días de Operación | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) |
| 01/12/2010      | 293               | 147                             | 94                                | 182                             | 130                               |
| 06/12/2010      | 298               | 249                             | 156                               | 177                             | 126                               |
| 17/12/2010      | 309               | 193                             | 131                               | 210                             | 135                               |
| 10/01/2011      | 333               | 132                             | 96                                | 158                             | 112                               |
| 12/01/2011      | 335               | 174                             | 111                               | 168                             | 122                               |
| 14/01/2011      | 337               | 201                             | 151                               | 186                             | 155                               |
| 17/01/2011      | 340               | 190                             | 135                               | 182                             | 148                               |
| 19/01/2011      | 342               | 206                             | 155                               | 194                             | 159                               |
| 24/01/2011      | 347               | 161                             | 64                                | 131                             | 107                               |
| 26/01/2011      | 349               | 195                             | 129                               | 210                             | 133                               |
| 31/01/2011      | 354               | 79                              | 51                                | 127                             | 124                               |
| 02/02/2011      | 356               | 141                             | 118                               | 203                             | 114                               |
| 08/02/2011      | 362               | 148                             | 119                               | 116                             | 80                                |
| 14/02/2011      | 368               | 229                             | 215                               | 228                             | 172                               |
| 16/02/2011      | 370               | 284                             | 216                               | 236                             | 180                               |
| 21/02/2011      | 375               | 284                             | 197                               | 275                             | 210                               |
| <b>Promedio</b> |                   | <b>188.31</b>                   | <b>133.63</b>                     | <b>186.44</b>                   | <b>137.94</b>                     |

| Periodo 2       |                   | Microplanta                     |                                   | Filtrado                        |                                   |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Fecha           | Días de Operación | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Total (mgO <sub>2</sub> /l) | DQO Soluble (mgO <sub>2</sub> /l) |
| 01/12/2010      | 293               | 96                              | 77                                | 118                             | 100                               |
| 06/12/2010      | 298               | 101                             | 78                                | 159                             | 121                               |
| 17/12/2010      | 309               | 174                             | 115                               | 149                             | 120                               |
| 10/01/2011      | 333               | 112                             | 75                                | 122                             | 80                                |
| 12/01/2011      | 335               | 118                             | 108                               | 121                             | 100                               |
| 14/01/2011      | 337               | 155                             | 111                               | 128                             | 135                               |
| 17/01/2011      | 340               | 124                             | 90                                | 136                             | 107                               |
| 19/01/2011      | 342               | 120                             | 82                                | 140                             | 110                               |
| 24/01/2011      | 347               | 75                              | 42                                | 128                             | 60                                |
| 26/01/2011      | 349               | 98                              | 83                                | 91                              | 118                               |
| 31/01/2011      | 354               | 84                              | 60                                | 85                              | 95                                |
| 02/02/2011      | 356               | 203                             | 138                               | 154                             | 141                               |
| 08/02/2011      | 362               | 91                              | 76                                | 116                             | 61                                |
| 14/02/2011      | 368               | 346                             | 231                               | 212                             | 189                               |
| 16/02/2011      | 370               | 292                             | 179                               | 220                             | 171                               |
| 21/02/2011      | 375               | 200                             | 182                               | 249                             | 168                               |
| <b>Promedio</b> |                   | <b>149.31</b>                   | <b>107.94</b>                     | <b>145.50</b>                   | <b>117.25</b>                     |

**Anexo II.**

En los siguientes gráficos (Figuras A2.1 y A2.2) se muestra el porcentaje de remoción de la DQO<sub>T</sub> y la DQO<sub>s</sub>.

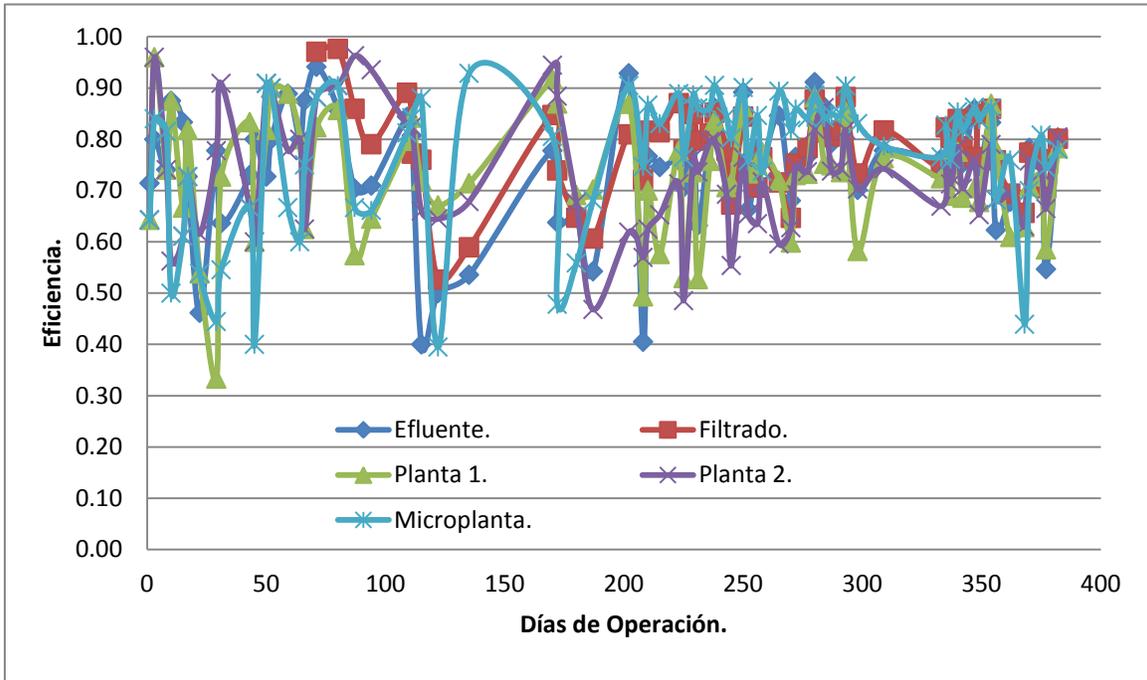


Figura A2.1. Comportamiento del porcentaje de remoción de la DQO<sub>T</sub>.

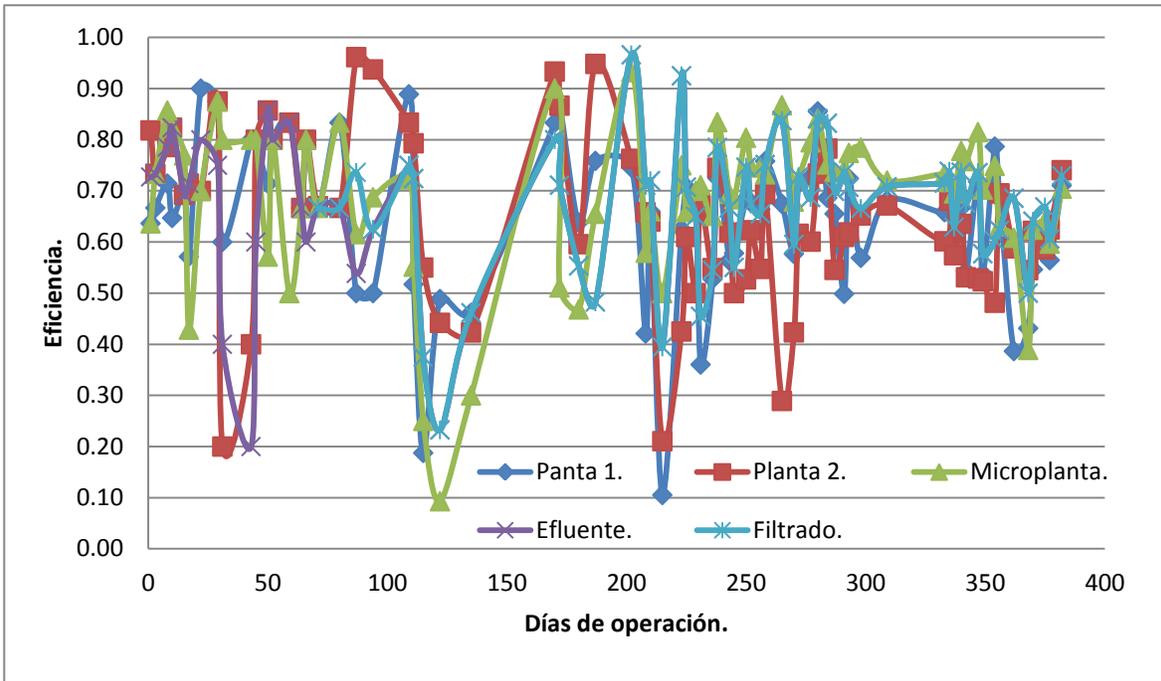


Figura A2.2 Comportamiento del porcentaje de remoción de la DQO<sub>s</sub>

En el gráfico A2.3 se muestra la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales, durante el periodo de experimentación.

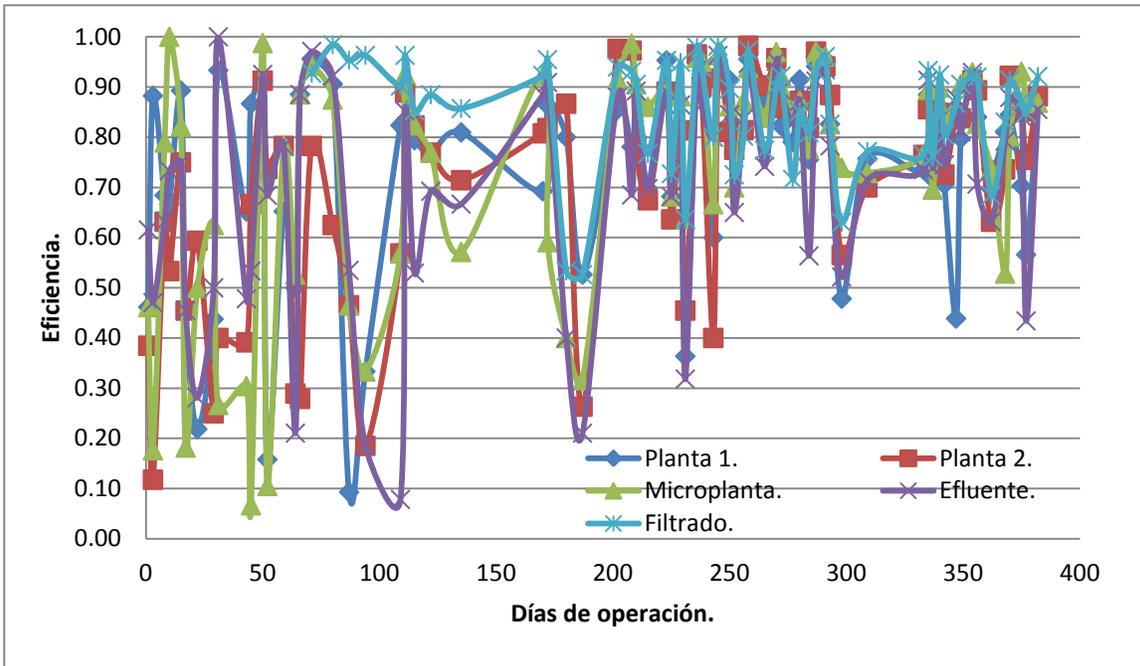


Figura A2.3 Comportamiento del porcentaje de remoción de SST.

Los gráficos A2.4 y A2.5 se muestran el comportamiento de los Sólidos Totales en los puntos de muestreo.

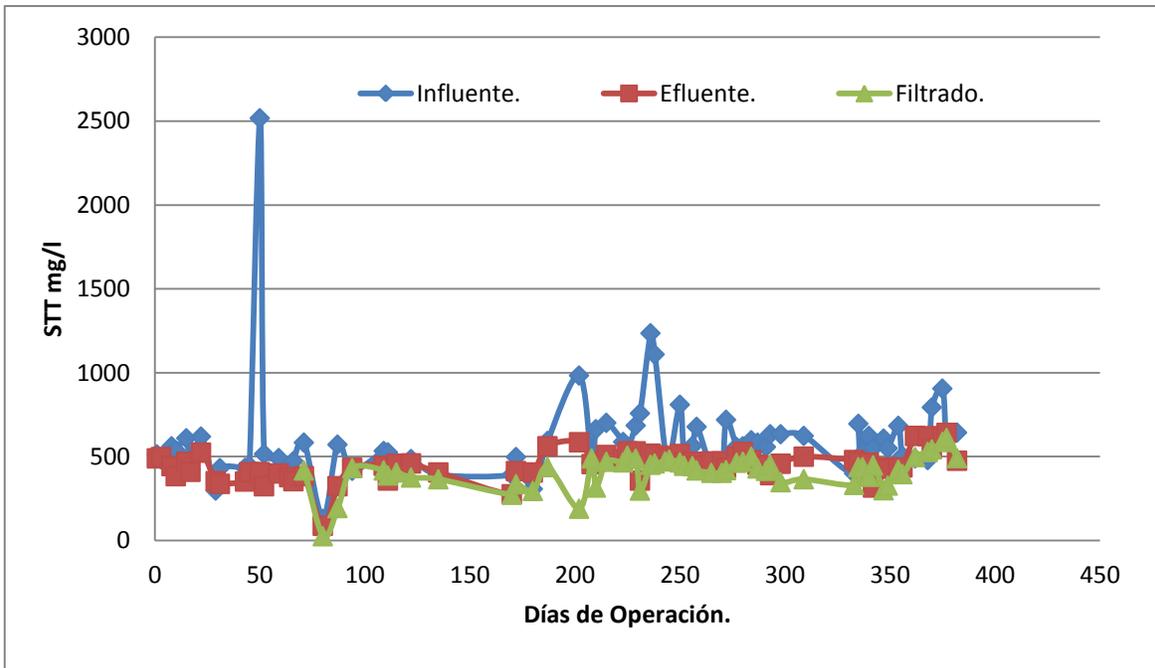


Figura A2.4 Comportamiento de los sólidos totales en el influente, efluente y filtrado.

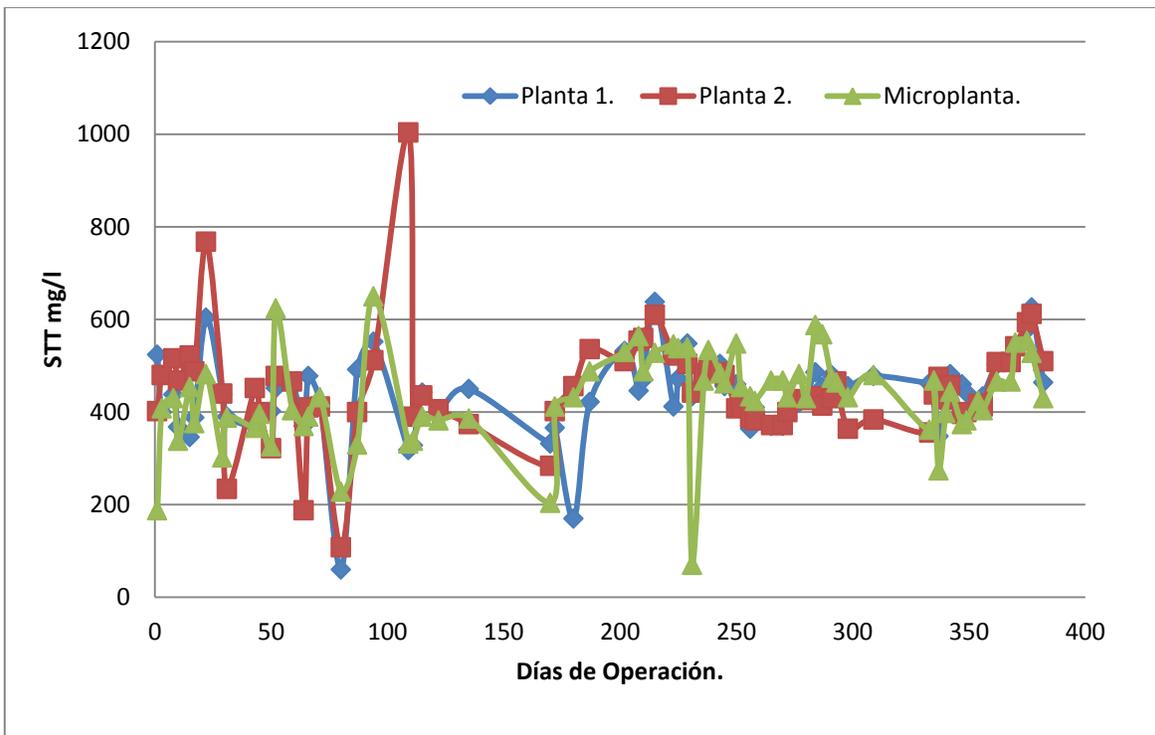


Figura A2.5 Comportamiento de los sólidos totales en las plantas biológicas.

### Anexo III

Tabla A3.1 Depreciación anual de los equipos.

| Equipo                                 | Costo               | Depreciación anual hasta el año 5 | Depreciación anual a partir del año 6 |
|--|---------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Bomba sumergible 0.5 hp</b>         | \$1,525.00          | \$305.00                          | \$0.00                                |
| <b>Tanque 5000L</b>                    | \$9,415.00          | \$941.5.00                        | \$941.5.00                            |
| <b>Tanque 450L</b>                     | \$999.00            | \$99.90                           | \$99.90                               |
| <b>Plantas Alibio</b>                  | \$40,000.00         | \$4,000.00                        | \$4,000.00                            |
| <b>Microplanta</b>                     | \$25,000.00         | \$2,500.00                        | \$2,500.00                            |
| <b>Tanque 100L</b>                     | \$270.00            | \$27.00                           | \$27.00                               |
| <b>Tanque 20L</b>                      | \$20.00             | \$2.00                            | \$2.00                                |
| <b>Bomba Hanna</b>                     | \$4,204.00          | \$840.80                          | \$0.00                                |
| <b>Electrobomba de una fase</b>        | \$763.00            | \$152.60                          | \$0.00                                |
| <b>Tanque precargado de acero inox</b> | \$250.00            | \$25.00                           | \$25.00                               |
| <b>Filtros</b>                         | \$15,000.00         | \$1,500.00                        | \$1,500.00                            |
| <b>Lámpara UV</b>                      | \$18,902.00         | \$1,890.20                        | \$1,890.20                            |
| <b>Tanque Nalene 40L</b>               | \$500.00            | \$50.00                           | \$50.00                               |
| <b>Bomba centrífuga</b>                | \$1,475.00          | \$295.00                          | \$0.00                                |
| <b>Hidroneumático</b>                  | \$8,858.00          | \$1,771.60                        | \$0.00                                |
| <b>Compresor 1 hp</b>                  | \$2,945.00          | \$294.50.00                       | \$0.00                                |
| <b>Sensor</b>                          | \$1,900.00          | \$190.00                          | \$190.00                              |
| <b>Total</b>                           | <b>\$132,026.00</b> | <b>\$14,885.10</b>                | <b>\$11,225.60</b>                    |

Tabla A3.2 Estado de Resultados.

|  | Año 0        | Año 1        | Año 2        | Año 3        | Año 4        |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Ahorro Bruto.</b>                     | \$28,500.00  | \$28,500.00  | \$28,500.00  | \$28,500.00  | \$28,500.00  |
| <b>Gastos de operación.</b>              | \$46,925.40  | \$46,925.40  | \$46,925.40  | \$46,925.40  | \$46,925.40  |
| <b>Ahorro neto antes de impuestos.</b>   | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 |
| <b>Tasa de Inflación.</b>                | -\$921.27    | -\$939.70    | -\$958.12    | -\$976.55    | -\$994.97    |
| <b>Ahorro neto después de impuestos.</b> | -\$17,504.13 | -\$17,485.71 | -\$17,467.28 | -\$17,448.86 | -\$17,430.43 |

|  | Año 5        | Año 6        | Año 7        | Año 8        |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Ahorro Bruto.</b>                     | \$28,500.00  | \$28,500.00  | \$28,500.00  | \$28,500.00  |
| <b>Gastos de operación.</b>              | \$46,925.40  | \$46,925.40  | \$46,925.40  | \$46,925.40  |
| <b>Ahorro neto antes de impuestos.</b>   | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 | -\$18,425.40 |
| <b>Tasa de Inflación.</b>                | -\$1,013.40  | -\$1,031.82  | -\$1,050.25  | -\$1,068.67  |
| <b>Ahorro neto después de impuestos.</b> | -\$17,412.01 | -\$17,393.58 | -\$17,375.16 | -\$17,356.73 |

Tabla A3.3. Flujo de efectivo.

| Años                                     | 0             | 1             | 2             | 3             | 4             |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Inversión fija.</b>                   | \$335,494.05  |               |               |               |               |
| <b>Capital de trabajo.</b>               | \$2,905.40    | \$2,905.40    | \$2,905.40    | \$2,905.40    | \$2,905.40    |
| <b>Ahorro neto después de impuestos.</b> | \$0.00        | -\$17,485.71  | -\$17,467.28  | -\$17,448.86  | -\$17,430.43  |
| <b>Valor de rescate de inversión</b>     | \$0.00        | \$33,549.40   | \$33,549.40   | \$33,549.40   | \$33,549.40   |
| <b>Depreciación</b>                      | \$0.00        | \$14,885.10   | \$14,885.10   | \$14,885.10   | \$14,885.10   |
| <b>Flujo de efectivo Total</b>           | -\$338,399.45 | \$28,043.40   | \$28,061.82   | \$28,080.25   | \$28,098.67   |
| <b>Análisis de recuperación</b>          |               | -\$310,356.05 | -\$282,294.23 | -\$254,213.98 | -\$226,115.31 |

| Años                                    | 5             | 6             | 7             | 8             |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Inversión fija</b>                   |               |               |               |               |
| <b>Capital de trabajo</b>               | \$2,905.40    | \$2,905.40    | \$2,905.40    | \$2,905.40    |
| <b>Ahorro neto después del impuesto</b> | -\$17,412.01  | -\$17,393.58  | -\$17,375.16  | -\$17,356.73  |
| <b>Valor de rescate de inversión</b>    | \$33,549.40   | \$33,549.40   | \$33,549.40   | \$33,549.40   |
| <b>Depreciación</b>                     | \$14,885.10   | \$11,225.60   | \$11,225.60   | \$11,225.60   |
| <b>Flujo de efectivo Total</b>          | \$28,117.10   | \$24,476.02   | \$24,494.45   | \$24,512.88   |
| <b>Análisis de recuperación</b>         | -\$197,998.21 | -\$173,522.18 | -\$149,027.73 | -\$124,514.86 |

## Anexo IV

En el anexo IV se explica con más detalle la operación de algunos controladores de la PTAR.

La planta de tratamiento de aguas residuales está semiautomatizada, es decir, parte del proceso se realiza por los operadores y la otra parte mediante controladores. El tanque séptico cuenta con un controlador de nivel, cuando el agua está por debajo del nivel la alimentación a las plantas biológicas se detiene. Este procedimiento ocurre durante el periodo vacacional, ya que no hay agua que pueda alimentar a la PTAR. El caso contrario es cuando el nivel del tanque séptico está muy alto, en este caso, el tanque séptico cuenta con un “bypass” que lleva el exceso de agua residual directamente al drenaje.

Uno de los más importantes controladores en la planta es el que regula la alimentación hacia las plantas biológicas. Mediante un timer instalado, se alimenta agua a las plantas biológicas durante 18 horas. Estas 18 horas están divididas en seis periodos de tres horas, es decir, durante tres horas se está alimentando a las plantas, una vez que terminan las tres horas, la alimentación se detiene durante una hora, en ese lapso se enciende otra bomba en el interior del tanque séptico que hace la función de recirculación con el fin de limpiar la bomba que se encuentra alimentando a las plantas. En la figura A4.1 se muestra el timer utilizado para regular los periodos de alimentación y de recirculación.



Figura A4.1 Tablero de control.

Como se ha mencionado anteriormente, el suministro de aire para las plantas biológicas proviene de un compresor ubicado en una bodega anexa. Cada diez minutos alimenta a las plantas de aire, cuando se disminuye la presión en la línea de tubería, el compresor se enciende de nuevo.

La alimentación de la bomba dosificadora de cloro, también se encuentra en función del timer de la bomba de alimentación. Cuando se detiene la alimentación a las plantas biológicas, también lo hace la bomba dosificadora.

En el primer tanque de almacenamiento se instalaron controladores de alto y bajo nivel, que regulan la alimentación de agua que va hacia los filtros. La luz UV se controla manualmente. Siempre que se está filtrando agua, la luz UV se enciende para que se pueda realizar la segunda etapa de desinfección.

Finalmente, las bombas centrífugas encargadas de bombear el agua hasta los sanitarios, funcionan de acuerdo a un controlador de nivel ubicado en el segundo tanque de almacenamiento. Si el nivel se encuentra muy bajo, no hay suministro de agua y las bombas no se encienden para evitar la cavitación. El agua no se suministra de forma continua, así que las bombas se regulan por la presión del hidroneumático. Cuando disminuye la presión a  $3\text{kg/cm}^3$  en interior del hidroneumático, las bombas se encienden para alcanzar una presión de  $6\text{kg/cm}^3$

presión suficiente para que el agua llegue al cuarto piso del edificio 12. Este ciclo se realiza cada vez que baja la presión en el manómetro del hidroneumático. Antes que el agua llegue a los sanitarios de los edificios, se instaló un detector de flujo en la línea de tubería. Este detector tiene en el interior de la tubería una placa que al moverse con el flujo del agua proveniente del hidroneumático, manda una señal a la bomba de diafragma para dosificar el colorante en la línea de tubería.