

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

**Evaluación y monitoreo del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y  
tratamiento de filtro percolador existente en una planta de tratamiento de  
aguas residuales de Acueductos y Alcantarillados en la urbanización Santa  
Cecilia en Puriscal.**

**Trabajo Final de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

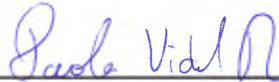
**Yancy Carolina Chacón Jiménez**

Directora de proyecto de graduación:

**Ing. Paola Vidal Rivera**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

**Directora:** Ing. Paola Vidal Rivera



---

**Asesor:** Ing. José Daniel Quesada Rojas



---

**Asesor:** Ing. Álvaro Araya García



---

**Estudiante:** Yancy Carolina Chacón Jiménez

**Fecha:** 2019, Julio, 02

**La suscrita, Yancy Carolina Chacón Jiménez,** cédula 1-1547-0692, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B21740**, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación **Evaluación y monitoreo del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y tratamiento de filtro percolador existente en una planta de tratamiento de aguas residuales de Acueductos y Alcantarillados en la urbanización Santa Cecilia en Puriscal**, bajo la Dirección de la **Ingeniera Paola Vidal Rivera**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

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

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

A mi madre Carmen Jiménez Vargas, por ser mi apoyo incondicional en todo momento, que me ha ayudado con su amor, paciencia y dedicación a cumplir mis metas y a salir adelante, a ella le debo mis logros y por ello le estaré eternamente agradecida.

## **Agradecimientos**

A mi familia, que me ha acompañado en el proceso de lograr mis metas.

A la ingeniera Paola Vidal, que me motivo para la realización de mi trabajo de graduación y me apoyó durante todo el desarrollo del mismo.

A los ingenieros Daniel Quesada y Álvaro Araya que me apoyaron como asesores del comité evaluativo y me guiaron durante el proceso del desarrollo de mi trabajo de graduación.

A los ingenieros José Luis Ugalde y Juan Diego Quirós, que me ayudaron facilitándome transporte e información de la planta, aparte del apoyo que siempre me brindaron.

A Dagoberto Oviedo por la ayuda brindada en el trabajo de laboratorio y trabajo en campo.

Al personal de la Planta de Santa Cecilia que me abrieron las puertas y me facilitaron la información a su alcance para el desarrollo de la investigación.

Y a todos aquellos que siempre me han brindado su apoyo.

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b>   | 1  |
| 1.1. INTRODUCCIÓN  | 1  |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA  | 1  |
| 1.3. IMPORTANCIA   | 2  |
| 1.4. OBJETIVOS   | 3  |
| 1.4.1. Objetivo general  | 3  |
| 1.4.2. Objetivos específicos   | 3  |
| 1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA   | 3  |
| 1.5.1. Alcance   | 3  |
| 1.5.2. Limitaciones  | 4  |
| <b>CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO</b>   | 7  |
| 2.1. AGUAS RESIDUALES  | 7  |
| 2.2. ETAPAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES   | 7  |
| 2.2.1 Pre tratamiento  | 8  |
| 2.2.2 Tratamiento primario   | 8  |
| 2.2.3 Tratamiento secundario   | 9  |
| 2.2.4 Tratamiento terciario  | 14 |
| 2.3. PARÁMETROS DE CONTROL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS  | 14 |
| 2.4. TRATAMIENTO AEROBIO   | 20 |
| 2.5. TRATAMIENTO ANAEROBIO   | 20 |
| 2.6. NITRIFICACIÓN Y DENITRIFICACIÓN   | 20 |
| <b>CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS</b>  | 22 |
| 3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA   | 22 |
| 3.1.1 Etapa de investigación bibliográfica   | 22 |
| 3.1.2 Caracterización de la condición actual de la PTAR de Santa Cecilia   | 23 |
| 3.1.3 Obtención de valores medidos de forma experimental de muestras puntuales obtenidas de la PTAR de Santa Cecilia   | 24 |
| 3.1.4 Revisión del diseño de los sistemas de tratamiento existentes UASB y filtro percolador   | 24 |
| 3.1.5 Análisis de los datos facilitados por AyA y los obtenidos en el laboratorio para verificar cumplimiento del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales. | 24 |
| 3.2 CONDICIONES DE MUESTREO  | 26 |
| 3.3 CONDICIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA  | 32 |
| 3.3.1 Parámetros utilizados para el diseño de los sistemas   | 32 |
| 3.3.2 Tiempo de retención hidráulica en el UASB y en el filtro   | 33 |
| 3.3.3 Carga volumétrica hidráulica y carga superficial hidráulica en el UASB y en el filtro  | 35 |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 3.3.4   | Carga orgánica volumétrica en el UASB y el filtro .....                 | 36        |
| 3.3.5   | Velocidad de flujo ascendente en el UASB .....                          | 36        |
| 3.4   | PRUEBAS DE LABORATORIO .....  | 37        |
| 3.4.1   | Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....                               | 37        |
| 3.4.2   | Demanda Química de Oxígeno (DQO) .....                                  | 40        |
| 3.4.3   | Sólidos Totales y Sólidos Suspendedos Totales .....                     | 41        |
| 3.4.4   | Sólidos Volátiles .....   | 43        |
| 3.4.5   | Sólidos Sedimentables .....   | 43        |
| 3.4.6   | Nitrógeno Amoniacal .....   | 44        |
| 3.4.7   | Nitrato .....   | 45        |
| 3.4.8   | Nitrito .....   | 46        |
| 3.4.9   | Fósforo .....   | 46        |
| <b>CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA URBANIZACIÓN SANTA CECILIA .....</b> |   | <b>48</b> |
| 4.1   | GENERALIDADES .....   | 48        |
| 4.1.1   | Ubicación .....   | 48        |
| 4.1.2   | Reseña histórica .....  | 49        |
| 4.1.3   | Aspectos socioeconómicos .....  | 50        |
| 4.1.4   | Condiciones climáticas .....  | 50        |
| 4.1.5   | Topografía .....  | 51        |
| 4.2   | DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO .....        | 52        |
| 4.2.1   | Caja de Rejas .....   | 55        |
| 4.2.2   | Desarenador .....   | 56        |
| 4.2.3   | Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) .....                      | 58        |
| 4.2.4   | Filtro Percolador .....   | 66        |
| 4.2.5   | Sedimentador Secundario .....   | 67        |
| 4.2.6   | Digestor de Lodos .....   | 69        |
| 4.2.7   | Lechos de Secado .....  | 69        |
| 4.2.8   | Caseta de Operación .....   | 70        |
| 4.3   | OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA .....                            | 71        |
| 4.4   | REVISIÓN DE DISEÑO DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO ..... | 73        |
| <b>CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>   |   | <b>85</b> |
| 5.1   | ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO .....          | 85        |
| 5.1.1   | Nitrógeno .....   | 85        |
| 5.1.2   | Fósforo .....   | 87        |
| 5.1.3   | Solidos suspendidos sedimentables .....                                 | 88        |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.1.4 | Sólidos Suspendidos Totales.....  | 89  |
| 5.1.5 | Sólidos Totales .....   | 90  |
| 5.1.6 | Coliformes fecales.....   | 91  |
| 5.1.7 | Potencial de hidrógeno.....   | 92  |
| 5.1.8 | Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....        | 93  |
| 5.2   | ANÁLISIS DE DATOS MEDIDOS EN CAMPO.....   | 96  |
| 5.2.1 | Temperatura .....   | 97  |
| 5.2.2 | Oxígeno disuelto.....   | 99  |
| 5.2.3 | Conductividad.....  | 100 |
| 5.2.4 | Potencial de hidrógeno.....   | 101 |
| 5.3   | ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL UCR..... | 103 |
| 5.3.1 | Nitrógeno.....  | 103 |
| 5.3.2 | Fósforo .....   | 111 |
| 5.3.3 | Sólidos totales .....   | 114 |
| 5.3.4 | Sólidos volátiles.....  | 117 |
| 5.3.5 | Sólidos suspendidos totales .....   | 119 |
| 5.3.6 | Sólidos suspendidos sedimentables.....  | 122 |
| 5.3.7 | Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .....        | 127 |
| 5.4   | ANÁLISIS DE LAS EFICIENCIAS OBTENIDAS EN CADA SISTEMA Y DE TODA LA PLANTA<br>137    |     |
|       | <b>CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....                             | 141 |
| 6.1   | Conclusiones.....   | 141 |
| 6.2   | Recomendaciones .....   | 145 |
|       | <b>CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | 149 |
|       | <b>CAPITULO 8. ANEXOS</b> .....   | A   |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Reactor anaeróbico de flujo ascendente.....  | 11 |
| Figura 2. Esquema de los componentes de un filtro percolador.....  | 12 |
| Figura 3. Vista de perfil de los componentes de un filtro percolador.....                                      | 12 |
| Figura 4. Evolución a del sistema DHS.....   | 14 |
| Figura 5. Esquema metodológico establecido para el desarrollo del proyecto de investigación.....               | 25 |
| Figura 6. Diagrama de flujo de la planta de Santa Cecilia y localización de los puntos de muestreo.....        | 27 |
| Figura 7. Punto de muestreo 1, caja de rejillas.....   | 28 |
| Figura 8. Punto de muestreo 2, entrada al filtro percolador y salida del UASB.....                             | 29 |
| Figura 9. Punto de muestreo 3, salida del filtro percolador.....   | 30 |
| Figura 10. Puntos de muestreo 4 y 5, válvulas de inspección del reactor UASB.....                              | 31 |
| Figura 11. Punto de muestreo 6, vertido de la planta.....  | 32 |
| Figura 12. Equipo de medición de DBO marca HACH.....   | 37 |
| Figura 13. Equipo de medición de DBO marca VELD Científica.....  | 38 |
| Figura 14. Incubadora ambiental de muestras marca EQUATHERM.....   | 39 |
| Figura 15. Digestor de DQO utilizado para la realización de las pruebas.....                                   | 40 |
| Figura 16. Viales de alto rango para obtener el DQO en las pruebas.....  | 40 |
| Figura 17. Colorímetros HACH implementados para la medición de los valores.....                                | 41 |
| Figura 18. Horno de secado de sólidos de la marca EQUATHERM.....   | 42 |
| Figura 19. Balanza de precisión para medición de los pesos de los sólidos de la marca ADAM.....                | 42 |
| Figura 20. Mufla utilizada para la obtención de los sólidos fijos de la marca Analytical.....                  | 43 |
| Figura 21. Conos Imhoff utilizados para la medición de sólidos sedimentables y velocidad de sedimentación..... | 44 |
| Figura 22. Reactivos para la realización del ensayo de nitrógeno amoniacal.....                                | 45 |
| Figura 23. Reactivos para la realización del ensayo de nitrato.....  | 45 |
| Figura 24. Reactivos para la realización del ensayo de nitrito.....  | 46 |
| Figura 25. Reactivos para la realización del ensayo de fósforo.....  | 47 |
| Figura 26. Ubicación de la zona de estudio.....  | 48 |
| Figura 27. Ubicación de la zona de estudio en el distrito de Santiago.....                                     | 49 |
| Figura 28. Mapa de rangos de elevación en msnm de la zona de estudio.....                                      | 51 |
| Figura 29. Mapa de rangos de pendiente en grados de la zona de estudio.....                                    | 52 |
| Figura 30. Distribución de la planta de tratamiento.....   | 53 |
| Figura 31. Reactor UASB y sistema de recolección de gases previo a las mejoras.....                            | 54 |
| Figura 32. Caja de rejillas y vertederos, previo a las modificaciones realizadas.....                          | 55 |
| Figura 33. Caja de rejillas de la planta de tratamiento de Santa Cecilia.....                                  | 56 |
| Figura 34. Entrada al desarenador de la planta de tratamiento de Santa Cecilia.....                            | 57 |
| Figura 35. Vertedero triangular del sedimentador primario.....   | 57 |
| Figura 36. Dimensionamiento del vertedor triangular.....   | 58 |
| Figura 37. Distribución de entrada al reactor UASB, antes y después de la colocación de los vertederos.....    | 59 |
| Figura 38. Reducción del tubo de entrada al reactor UASB.....  | 59 |
| Figura 39. Canaleta de fibra de vidrio y orificio de salida del agua del reactor UASB.....                     | 60 |
| Figura 40. Vertederos triangulares de la canaleta y sellado de las filtraciones.....                           | 60 |
| Figura 41. Válvulas de inspección de lodos del reactor UASB.....   | 61 |
| Figura 42. Dimensionamiento frontal de los componentes del reactor UASB.....                                   | 62 |
| Figura 43. Vista en planta de los componentes del reactor UASB.....  | 63 |
| Figura 44. Corte A-A Distribución lateral de las válvulas de inspección del reactor UASB.....                  | 64 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 45. Distribución en planta de las válvulas de inspección del reactor UASB. ....  | 65  |
| Figura 46. Trampas de humos y de llamas del reactor UASB .....  | 65  |
| Figura 47. Zona superior del filtro previo al cambio del material de soporte por esponjas. ....   | 66  |
| Figura 48. Zona superior del filtro después del cambio del material de soporte por esponjas. ....   | 67  |
| Figura 49. Entrada al sedimentador secundario. ....   | 68  |
| Figura 50. Sedimentador secundario con presencia de sólidos flotantes. ....   | 68  |
| Figura 51. Digestor de lodos y lecho de secado de lodos .....   | 69  |
| Figura 52. Lecho de secado de lodos de la PTAR .....  | 70  |
| Figura 53. Caseta de operación de la PTAR .....   | 70  |
| Figura 54. Distribución de las zonas de tratamiento de un reactor UASB .....  | 77  |
| Figura 55. Tiempo de estabilización de lodos requerido para el tratamiento de aguas residuales<br>domésticas.....                             | 78  |
| Figura 56. Gráfico de dispersión del Nitrato Total.....   | 86  |
| Figura 57. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Amoniacal.....   | 86  |
| Figura 58. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Total .....  | 87  |
| Figura 59. Gráfico de dispersión del Fósforo .....  | 88  |
| Figura 60. Gráfico de dispersión de los Sólidos Sedimentables .....   | 89  |
| Figura 61. Gráfico de dispersión de los Sólidos Suspendidos Totales, con valor límite según reglamento<br>.....                               | 90  |
| Figura 62. Gráfico de dispersión de los Sólidos Totales.....  | 91  |
| Figura 63. Gráfico de dispersión de los Coliformes Fecales .....  | 92  |
| Figura 64. Gráfico de dispersión del Potencial de Hidrógeno con valores límite según reglamento.....  | 93  |
| Figura 65. Gráfico de dispersión de la Demanda Química de Oxígeno, con valor límite según<br>reglamento.....                                  | 94  |
| Figura 66. Gráfico de dispersión de la Demanda Biológica de Oxígeno, con valor límite según<br>reglamento.....                                | 95  |
| Figura 67. Gráfico de dispersión de la relación de DBO/DQO .....  | 96  |
| Figura 68. Gráfico de dispersión de temperatura en todos los puntos de medición en campo.....   | 98  |
| Figura 69. Gráfico de dispersión de temperatura en la entrada y vertido de la planta y valores límites<br>según reglamento.....               | 99  |
| Figura 70. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto en todos los puntos de medición en campo.....  | 100 |
| Figura 71. Gráfico de dispersión de conductividad en todos los puntos de muestreo .....   | 101 |
| Figura 72. Gráfico de dispersión de potencial de hidrógeno en todos los puntos de medición en campo<br>.....                                  | 102 |
| Figura 73. Gráfico de dispersión de potencial de hidrógeno en todos los puntos de medición en campo<br>y valores límite según reglamento..... | 103 |
| Figura 74. Gráfico de dispersión del nitrato en todos los puntos medidos. ....  | 104 |
| Figura 75. Gráfico de dispersión del nitrito en todos los puntos medidos. ....  | 104 |
| Figura 76. Gráfico de dispersión del nitrógeno amoniacal en todos los puntos medidos. ....  | 105 |
| Figura 77. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la entrada de la planta .....  | 106 |
| Figura 78. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la entrada del filtro .....  | 107 |
| Figura 79. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la salida del filtro .....   | 107 |
| Figura 80. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la válvula 5.....  | 108 |
| Figura 81. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la válvula 6.....  | 108 |
| Figura 82. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en el vertido.....  | 109 |
| Figura 83. Gráfico de cajas de Nitrato de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.....   | 110 |
| Figura 84. Gráfico de cajas de Nitrito de los puntos de muestreo, excepto las válvulas. ....  | 110 |
| Figura 85. Gráfico de cajas de Nitrógeno amoniacal de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.<br>.....                                  | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 86. Gráfico de dispersión del fósforo en todos los puntos medidos.....   | 112 |
| Figura 87. Gráfico de dispersión de fósforo de todos los puntos de muestreo. ....   | 112 |
| Figura 88. Gráfico de cajas de fósforo de los puntos de muestreo, excepto las válvulas. ....  | 113 |
| Figura 89. Gráfico de dispersión de la relación P/DBO en la entrada de la planta .....  | 114 |
| Figura 90. Gráfico de dispersión de sólidos totales, excepto las válvulas.....  | 115 |
| Figura 91. Gráfico de dispersión de sólidos totales en la entrada y vertido de la planta .....  | 116 |
| Figura 92. Gráfico de cajas de sólidos totales de todos los puntos de muestreo .....  | 116 |
| Figura 93. Gráfico de cajas de sólidos totales de los puntos de muestreo, excepto las válvulas. ....  | 117 |
| Figura 94. Gráfico de dispersión de los sólidos volátiles, excluyendo las válvulas.....   | 118 |
| Figura 95. Gráfico de cajas de sólidos volátiles de todos los puntos de muestreo .....  | 118 |
| Figura 96. Gráfico de cajas de sólidos volátiles de los puntos de muestreo, excepto las válvulas. ....  | 119 |
| Figura 97. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales, excluyendo las válvulas.....   | 120 |
| Figura 98. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento.....   | 120 |
| Figura 99. Gráfico de cajas de sólidos suspendidos totales en todos los puntos de muestreo .....  | 121 |
| Figura 100. Gráfico de cajas de sólidos suspendidos totales de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.....                                | 122 |
| Figura 101. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables en todos los puntos de muestreo.....   | 123 |
| Figura 102. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables, excepto la válvula 5.....   | 123 |
| Figura 103. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento .....       | 124 |
| Figura 104. Gráfico de cajas de sólidos sedimentables de todos los puntos de muestreo .....   | 125 |
| Figura 105. Gráfico de cajas de sólidos sedimentables de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.....                                      | 126 |
| Figura 106. Gráfico de dispersión de la velocidad de sedimentación, excepto válvulas.....   | 127 |
| Figura 107. Gráfico de dispersión de DQO en todos los puntos de muestreo.....   | 128 |
| Figura 108. Gráfico de dispersión de DQO en los puntos de muestreo, excepto las válvulas .....  | 128 |
| Figura 109. Gráfico de dispersión de la demanda química de oxígeno en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento.....    | 130 |
| Figura 110. Gráfico de cajas de DQO de los puntos de muestreo, excepto las válvulas. ....   | 130 |
| Figura 111. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en todos los puntos de muestreo .....                                     | 131 |
| Figura 112. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en los puntos de muestreo, excepto válvulas y valor de entrada PTAR ..... | 132 |
| Figura 113. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento..... | 133 |
| Figura 114. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en el vertido de la planta y valor límite según reglamento .....          | 133 |
| Figura 115. Gráfico de cajas de DBO en todos los puntos de muestreo .....   | 134 |
| Figura 116. Gráfico de cajas de DBO de los puntos de muestreo con las concentraciones menores..   | 135 |
| Figura 117. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO .....  | 136 |
| Figura 118. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO, excepto la entrada PTAR y válvulas .....  | 137 |

## INDICE DE CUADROS

|   |     |
|---|-----|
| Cuadro 1. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor. ....          | 8   |
| Cuadro 2. Tipo de contaminación con respecto a la relación de DBO/DQO .....   | 16  |
| Cuadro 3. Composición de aguas residuales domésticas.....   | 16  |
| Cuadro 4. Efectos de la temperatura del agua residual en los procesos biológicos.....   | 19  |
| Cuadro 5. Condiciones de diseño de los sistemas de la planta de tratamiento de Santa Cecilia .....  | 32  |
| Cuadro 6. Parámetros de control que se miden en la planta de forma rutinaria en el vertido de la planta. ....   | 33  |
| Cuadro 7. Tiempos de retención hidráulica teóricos del reactor UASB y filtro percolador.....  | 34  |
| Cuadro 8. Cargas volumétricas hidráulicas y cargas superficiales hidráulicas del reactor UASB y filtro percolador.....  | 35  |
| Cuadro 9. Cargas orgánicas volumétricas teóricas del reactor UASB y filtro percolador .....   | 36  |
| Cuadro 10. Velocidades de flujo ascendente teóricas del reactor UASB. ....  | 37  |
| Cuadro 11. Acciones de mantenimiento de los sistemas de la planta y frecuencias de realización recomendadas. ....   | 71  |
| Cuadro 12. Actividades de mantenimiento de los sistemas de la planta, frecuencias de realización y cumplimiento según el reglamento y manual de operación. .... | 72  |
| Cuadro 13. Eficiencias de remoción para la selección de los procesos de tratamiento.....  | 73  |
| Cuadro 14. Efectos de los principales contaminantes en las aguas residuales domésticas .....  | 74  |
| Cuadro 15. Características de un filtro rociador según las cargas o tipo de filtro. ....  | 75  |
| Cuadro 16. Características del filtro existente en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Santa Cecilia .....                               | 75  |
| Cuadro 17. Características esperadas de la roca quebrada como material de soporte. ....   | 76  |
| Cuadro 18. Características del material de soporte existente en la planta .....   | 76  |
| Cuadro 19. Tiempos de retención hidráulica para la protección de los reactores UASB .....   | 78  |
| Cuadro 20. Velocidades de flujo superficial recomendadas para el diseño de reactores UASB destinados a tratamiento de aguas residuales domésticas .....         | 79  |
| Cuadro 21. Para determinar el área de influencia de los distribuidores de flujo en el reactor .....   | 79  |
| Cuadro 22. Características del reactor UASB existente para el tratamiento de lodos .....  | 79  |
| Cuadro 23. Principales criterios hidráulicos para el diseño de un reactor UASB de aguas residuales domésticas.....  | 80  |
| Cuadro 24. Criterios hidráulicos del reactor UASB existente en la planta.....   | 80  |
| Cuadro 25. Criterios de diseño para reactores anaerobios de flujo ascendente para aguas residuales domésticas.....  | 81  |
| Cuadro 26. Valores de diseño del reactor UASB en la planta de tratamiento de Santa Cecilia .....  | 82  |
| Cuadro 27. Retiros mínimos a linderos de propiedad .....  | 83  |
| Cuadro 28. Rotulación de tuberías .....   | 83  |
| Cuadro 29. Cumplimiento de las obligaciones del ente generador .....  | 84  |
| Cuadro 30. Resumen de valores de los nutrientes presentes en el agua residual.....  | 114 |
| Cuadro 31. Resumen de valores de los sólidos presentes en el agua residual .....  | 127 |
| Cuadro 32. Resumen de valores de DBO, DQO y relación DBO/DQO presentes en el agua residual..  | 137 |
| Cuadro 33. Comparación de eficiencias de remoción de DQO en cada sistema.....   | 138 |
| Cuadro 34. Comparación de eficiencias de remoción de DBO en cada sistema. ....  | 138 |
| Cuadro 35. Eficiencias de remoción de DBO y DQO experimentales para el sistema conjunto de filtro y sedimentador secundario .....                               | 139 |
| Cuadro 36. Eficiencias de remoción de DBO y DQO experimentales para el tratamiento completo....   | 139 |

Chacón Jiménez, Yancy Carolina

Evaluación del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y tratamiento de filtro percolador existente en una planta de tratamiento de aguas residuales de Acueductos y Alcantarillados en la urbanización Santa Cecilia en Puriscal.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

Y. Chacón J., 2019

xi, 149 [8] h; ils.col.- 23 ref

## **Resumen**

Se realizó este trabajo con el fin de evaluar la efectividad de los sistemas de reactor UASB y filtro percolador de la PTAR Santa Cecilia de Puriscal, operada por A y A, a partir de revisiones teóricas de diseño y condiciones de operación de la planta, así como el cálculo de eficiencias de cada sistema individual con el fin de generar recomendaciones para mejorar su funcionamiento e incentivar tecnologías de tratamiento de aguas residuales con menor consumo energético.

Se evaluaron las dimensiones de los sistemas a partir de planos y mediciones de campo para determinar cuáles cumplen con los valores esperados según la teoría, se tomaron muestras en puntos específicos para realizar ensayos de laboratorios y verificar la calidad del agua a la salida de cada componente del sistema y al vertido, se compararon las frecuencias de operación y mantenimiento que se realizan en la planta con las que establece el Reglamento y se realizaron observaciones de acuerdo a prácticas observadas de los operarios.

Las malas prácticas de operación afectan la eficiencia de remoción de los sistemas y pueden perjudicar la calidad del agua ya tratada, el uso de las esponjas como material de soporte en el filtro reduce la cantidad de sólidos y estabiliza los valores de salida, los altos TRH y baja velocidad de flujo ascendente del reactor UASB disminuye la colisión entre partículas, densifica los lodos y afecta el correcto funcionamiento del sistema, las eficiencias de remoción de DQO son más bajas a las esperadas en ambos sistemas, mientras que para DBO el reactor UASB presenta resultados satisfactorios, pero el filtro no debido a la baja carga de entrada.

Palabras clave: UASB, DHS, filtro percolador, biomasa, biopelícula, eficiencia de remoción, DBO, DQO, nitrificación, tratamiento aerobio, tratamiento anaerobio, tratamiento primario, sedimentador, estabilización de lodos.

Ing. Paola Vidal Rivera

Escuela de Ingeniería Civil

## Abreviaturas

**DHS:** Downflow Hanging Sponges

**DBO:** Demanda bioquímica de oxígeno

**DQO:** Demanda química de oxígeno

**AyA:** Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

**PTAR:** Planta de tratamiento de aguas residuales

**RAFA:** Reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (UASB)

**SST:** Sólidos suspendidos totales

**SSV:** Sólidos suspendidos volátiles

**SSED:** Sólidos sedimentables

**UASB:** Upflow Anaerobic Sludge Blanket

**P:** Fósforo

**NO<sub>3</sub>:** Nitratos

**NO<sub>2</sub>:** Nitritos

**N:** Nitrógeno

**pH:** Potencial de hidrogeno

**OD:** Oxígeno Disuelto

**T:** Temperatu

# **CAPITULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

El tratamiento de las aguas residuales ha cobrado mayor importancia en los últimos años, y se han implementado una serie de sistemas que se combinan de acuerdo a las necesidades de la población, considerando las limitaciones energéticas, climáticas, ambientales, de espacio disponible, entre otros.

La mayoría de la PTAR que existen en el país, han implementado el sistema de tratamiento de lodos activados, pero estos requieren de un alto consumo energético para obtener los resultados deseados, por lo que se promueve mediante esta investigación el uso de tecnologías de tratamiento que no requieran de inversión significativa en costos de operación.

Al analizar el sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) que funciona como tratamiento anaerobio, resulta en un amplio ahorro energético, debido a que trabaja de forma autosustentable. También, para el filtro percolador se consideran formas de aireación natural por medio de espacios abiertos alrededor del filtro.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

El saneamiento de aguas residuales en Costa Rica es muy limitado, aproximadamente un 13,4 % del total del agua residual no recibe ningún tratamiento después de su uso. Además, cerca del 70 % del agua residual ordinaria es tratada con tanques sépticos; pero este sistema es cada vez más inviable debido al mal diseño de los mismos, a la infiltración del terreno y a su mal manejo y mantenimiento. (García, 2018)

La planta de tratamiento de la urbanización de Santa Cecilia en Puriscal se encontraba en estado de abandono previo a que el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) se hiciera cargo de la administración de la misma entre los años 2008 y 2009. La planta no ha sido evaluada de forma completa con respecto al funcionamiento de los sistemas pertenecientes al mismo de forma independiente por tanto se desconoce la eficiencia de los mismos.

Los sistemas de Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) y filtro percolador se han estudiado muy poco en el país y no se han evaluado directamente los impactos del sistema en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en las que se ha implementado. Las PTAR de la periferia, reciben menor inversión y monitoreo, por lo tanto la información que se tiene acerca del funcionamiento de los sistemas de tratamientos es escaso, en el caso específico del sitio de estudio los valores obtenidos tanto del UASB como del filtro percolador no cumplen con lo establecido en el Reglamento de Vertido y Reúso de aguas residuales No. 33601. (Mora, Mata, & Portuguez, 2016)

### **1.3. IMPORTANCIA**

El tratamiento de las aguas residuales genera un impacto positivo en la salud de las personas y disminuye el impacto en los cuerpos receptores y ecosistemas acuáticos, por lo que se debe dar el mantenimiento y monitoreo adecuado de las plantas de tratamiento, esto con el fin de evitar que las condiciones de vertido cambien, aumentando la concentración de parámetros nocivos. Los elementos que conforman el proceso de tratamiento pueden reducir su eficiencia por algún daño en componentes considerados en el diseño inicial, por un bajo mantenimiento o por ser operados en condiciones inadecuadas.

No existen registros previos en el país del funcionamiento individual del sistema en conjunto del reactor UASB y filtro percolador, ya que las mediciones de los parámetros que realiza el Laboratorio Nacional de Aguas son a nivel global de PTAR.

Los sistemas por evaluar se pretenden seguir implementando en plantas de tratamiento en el país, debido al bajo costo operativo y a que no presentan alta sensibilidad a los cambios, por lo que el mantenimiento es poco; pero no se han evaluado a fondo los efectos directos de estos sistemas sobre los parámetros que se pretenden reducir.

Al generar datos puntuales que referencien la efectividad de este tipo de sistemas, se pueden recomendar mejoras tanto a nivel operacional como en la implementación de nuevos sistemas que complementen el funcionamiento de la planta.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

- ✓ Evaluar la efectividad en la planta de tratamiento de Acueductos y Alcantarillados de la urbanización de Santa Cecilia en Puriscal, del sistema existente UASB y filtro percolador.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- ✓ Revisar el diseño y las condiciones operativas en la planta de tratamiento de aguas residuales a partir de observación en sitio y documentación existente.
- ✓ Analizar la eficiencia del sistema de UASB y filtro percolador a partir de parámetros básicos de funcionamiento utilizados en la planta de tratamiento de aguas residuales.
- ✓ Proponer recomendaciones para el mejoramiento del sistema como parte de la planta de tratamiento de aguas residuales y a las acciones de operación y mantenimiento realizadas.

## **1.5. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.5.1. Alcance**

El análisis se desarrolló en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de la Urbanización Santa Cecilia, ubicada en la zona de Puriscal, esta se encuentra a cargo de AyA; lo que se realizó para la debida evaluación del sistema UASB y filtro percolador abarcó lo siguiente:

- ✓ Se evaluaron las condiciones de funcionamiento de la PTAR y las características particulares de la planta como se encuentra en el periodo en el que se realizó este trabajo. (ESTO YA SE MENCIONA EN LA PARTE DE RESULTADOS)
- ✓ Se utilizan como base los análisis de caudales que trata la planta a partir de los datos brindados por AyA. (ESTO YA SE MENCIONA EN LA PARTE DE RESULTADOS)
- ✓ Se evalúa el cumplimiento de vertido de los reportes operacionales según los informes presentados por el operador al Ministerio de Salud y, según los datos obtenidos durante la fase de experimentación, los cuales se compararon con los

valores límites establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales No.33601.

- ✓ No se realizaron los diseños finales de incorporación de nuevos sistemas para el mejoramiento de la calidad del agua de vertido mencionados en las recomendaciones.
- ✓ Se revisa el diseño del UASB y filtro percolador para las condiciones de caudal que recibe la planta para reducir los valores de los parámetros medidos y para poder corroborar la eficiencia del sistema.
- ✓ No se va a revisar con detalle el funcionamiento de la caja de rejillas, el desarenador, el lecho de secado y los sedimentadores primarios y secundarios.
- ✓ Se realizó la caracterización de la planta en su condición actual a partir de los registros existentes que ha realizado Acueductos y Alcantarillados y se comparó con el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No.33601 y con el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales No.31545 y datos teóricos de funcionamiento de sistemas similares.
- ✓ Se realizaron análisis puntuales antes de que el agua residual ingrese al UASB y filtro percolador y luego de que salga de este, estos análisis incluyen los parámetros: Sólidos suspendidos volátiles y no volátiles, DBO, DQO, nutrientes como el fósforo y nitrógeno.
- ✓ Las pruebas de laboratorio realizadas en la fase experimental no cuentan con certificación.
- ✓ En la fase experimental no se realizan pruebas de los parámetros de coliformes fecales ni de azul de metileno.

### **1.5.2. Limitaciones**

- ✓ Las plantas de tratamiento en el país que poseen el sistema UASB con filtro percolador son escasas por lo tanto no se cuenta con suficiente información para comparar los resultados de manera adecuada. Además, en la planta de Bosques de Santa Ana (planta con diseño inicial similar a la planta de Santa Cecilia) se cambió el filtro percolador por lodos activados.
- ✓ No hay registros de datos operativos del sistema de reactor UASB con filtro percolador a partir de datos individuales.

- ✓ No hay registros continuos de los funcionamientos de la planta a nivel global a partir de parámetros obtenidos, solos puntuales y aislados.
- ✓ Los datos históricos disponibles de caudal y calidad de la planta solo incluyen datos de entrada y de vertido, no se cuenta con mediciones de eficiencia por etapa.
- ✓ No se cuenta con registros de las consideraciones de diseño del UASB y en el caso del filtro percolador no se realizó diseño previo.
- ✓ No se pudo hacer medición en campo de los componentes internos de UASB, por lo tanto, se suponen como reales las dimensiones establecidas en los planos para la revisión del diseño del sistema.
- ✓ De las seis válvulas de inspección que posee el reactor UASB, solo se pudieron obtener muestras de dos debido a que el flujo de las válvulas restantes estaba bloqueado.
- ✓ Al encontrarse en funcionamiento el reactor UASB durante el periodo de estudio, no se pudo obtener acceso al interior de este para corroborar las dimensiones dadas en los planos.
- ✓ No existen bitácoras detalladas de las acciones que realiza el personal encargado de la planta, ni protocolos claros de operación y mantenimiento específicos para cada sistema.
- ✓ No fue posible obtener muestras compuestas del manto de lodos del reactor UASB por la inoperancia de las válvulas.
- ✓ No se pudo obtener muestras inmediatamente a la salida del filtro por la posición de las tuberías por lo que se tuvo que tomar del agua superficial a la entrada del sedimentador secundario.
- ✓ Los valores obtenidos con el medidor multiparámetros en campo para el punto de entrada a la planta no se pudieron realizar en la caja de rejas, por lo que este valor se tuvo que tomar en el sedimentador primario.
- ✓ No se pudo observar con claridad la distribución de las rocas dentro del filtro y tampoco si se presentaba desprendimiento de biomasa o de partículas del medio de soporte.
- ✓ No se cuenta con mediciones de caudal en la entrada y salida del reactor UASB y filtro percolador.

- ✓ No se pudieron realizar mediciones al filtro percolador que se usaba previamente para revisar si se presentaba un aumento de remoción significativo con el cambio del sistema.

## **CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. AGUAS RESIDUALES**

Representan la condición del agua luego de salir del sistema de distribución de agua potable, es aquella que se ha expuesto a los contaminantes del medio y representan un peligro y por lo tanto se deben desechar, suelen contener gran cantidad de sustancias y/o microorganismos y por lo tanto ser una posible causa y vehículo de contaminación, si se han evaluado sin un tratamiento previo. (Espigares & Pérez, 1992)

Las aguas residuales pueden provenir de actividades industriales o agrícolas y del uso doméstico. Los tratamientos de aguas industriales son muy variados, según el tipo de contaminación, y pueden incluir precipitación, neutralización, oxidación química y biológica, reducción, filtración, ósmosis, entre otros procesos.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTAR) se enfocan en el tratamiento biológico o secundario, ya que el agua residual urbana es fundamentalmente de carácter orgánico. (aquatecnit, 2015)

Estos sistemas se componen por diferentes etapas según las características físicas, químicas y biológicas del agua a tratar a considerar en su depuración. Estas etapas se separan en procesos de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.

### **2.2. ETAPAS DE TRATAMIENTO PARA AGUAS RESIDUALES**

El tratamiento que requieren las aguas residuales depende de los límites que debe cumplir con respecto a los reglamentos existentes, y con respecto al uso que se espera del agua ya tratada. En Costa Rica, se utiliza el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales No.33601 para comparar la calidad del agua en el efluente de las plantas de tratamiento, los valores límites que establece dicho reglamento se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales vertidas en un cuerpo receptor.

| <b>Parámetro</b>                       | <b>Límite</b> |
|--|---------------|
| DBO <sub>5,20</sub> (mg/L)             | 50            |
| DQO (mg/L)                             | 150           |
| Sólidos suspendidos (mg/L)             | 50            |
| Grasas y aceites (mg/L)                | 30            |
| Potencial de hidrógeno                 | 5,0 - 9,0     |
| Temperatura (°C)                       | 15 - 40       |
| Sólidos sedimentables (mL/L)           | 1,0           |
| Sustancias activas al azul de metileno | 5,0           |

Fuente: Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, 2006

### **2.2.1 Pre tratamiento**

Son las operaciones que se realizan previo al tratamiento, se encuentran en general antes de entrar a la planta de tratamiento, pueden considerar elementos como rejillas y mallas que ayuden a la separación de los residuos sólidos de mayor tamaño. (República de Ecuador)

Estos sistemas también se pueden considerar como parte del tratamiento primario de las aguas residuales cuando se localizan dentro de las instalaciones de la planta de tratamiento.

### **2.2.2 Tratamiento primario**

“Contempla el uso de operaciones físicas como sedimentación, desbaste para la eliminación de **sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual.**” Se elimina una fracción de sólidos en suspensión y de materia orgánica. Suele llevarse a cabo mediante sedimentación y tamizado. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una DBO alta. (República de Ecuador)

Este tratamiento implica la eliminación o reducción de los sólidos en suspensión, de sólidos sedimentables y demás, que se puedan separar por medios físicos únicamente, también se usa para el acondicionamiento de las aguas residuales, ya sea para la descarga en los cuerpos receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una neutralización u homogeneización. (Ramalho, s.f.)

### 2.2.3 Tratamiento secundario

“Se realizan procesos biológicos y químicos, los cuales se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica.” Está principalmente encaminado a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento. (República de Ecuador)

Incluye el tratamiento con lodos activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación secundaria entre otros. Dentro de estos tratamientos secundarios se pueden considerar los siguientes:

Reactores anaerobios de mantos de lodos y flujo ascendente (UASB): “Constituyen una tecnología de tratamiento en la que el agua pasa a través de un manto de lodos a baja velocidad ascensional. Se caracterizan por realizar en una sola unidad las operaciones de decantación primaria, reactor biológico y digestión anaerobia del lodo.” (Observatorio del agua, 2015)

En el reactor anaerobio de flujo ascendente, el agua residual es conducida desde los tubos de entrada en la parte superior del reactor hasta el fondo del mismo. El afluente fluye en sentido ascendente por medio de unos orificios de entrada en la parte inferior del reactor y pasa a través del manto de lodos con una velocidad de ascenso que no permita la resuspensión de los lodos, los sólidos sedimentables quedan en la parte inferior, la segunda fase consiste en la parte líquida que sale por los vertederos y finalmente en la fase gaseosa, la campana recolecta el biogás producido en condiciones anaerobias, que consiste principalmente en metano y dióxido de carbono

En este proceso se debe controlar la temperatura del agua y de los lodos en el interior del reactor así como su volumen, ya que cualquier variación importante puede afectar el desarrollo bacteriano, la capacidad de tratamiento de los reactores biológicos está relacionada con la cantidad de biomasa activa que pueda tener el sistema, así como con el contacto eficiente entre la biomasa y el agua residual.

Una de las ventajas del uso del reactor UASB es su bajo consumo energético para su funcionamiento, además generan biogás que puede ser utilizado como recurso energético, y los lodos de purga estabilizan la materia orgánica manteniendo los nutrientes fertilizantes, por lo que estos lodos se pueden utilizar en el medio agrícola. (Comisión Nacional del Agua)

La velocidad del flujo ascendente del agua en el reactor representa un factor restrictivo respecto al volumen requerido al tratar aguas residuales con muy baja concentración de carga orgánica, así como con aguas residuales con un alto contenido de sólidos suspendidos.

Al aumentar la velocidad de flujo ascendente, se aumenta la tasa de colisión o choque entre las partículas de agua del afluente y las partículas que componen el lecho de lodo, pudiendo así mejorar la eficiencia de remoción.

Pero, a su vez, el aumento de la velocidad de flujo ascendente puede causar un aumento de la fuerza hidráulica de corte, la cual contrarresta el mecanismo de remoción por exceder a la velocidad de sedimentación de más partículas y la separación de los sólidos capturados y, en consecuencia, empeorar la eficiencia de remoción, por lo tanto, se debe verificar que la velocidad de flujo ascendente se mantenga en un rango adecuado.

A mayores velocidades ascendentes de alimentación, se obtienen porcentajes más bajos de remoción de DQO soluble y total, menor volumen de agua residual tratada y menor carga orgánica al reactor, lo que a su vez afecta la producción de biogás. Por otro lado, al disminuir la velocidad de alimentación, la remoción de SST y SSV también se reduce, lo que influye en el aumento de la cantidad de biomasa dentro del reactor.

Al aumentar el volumen de agua residual tratada en el reactor anaerobio, se disminuyen los costos de operación en el tratamiento posterior aerobio. Al favorecer el aumento de la biomasa dentro del reactor anaerobio, se evita la compra constante de biomasa y se tiene la posibilidad de venderla para la operación y arranque de otros digestores. (Iñiguez & Camacho, 2011)

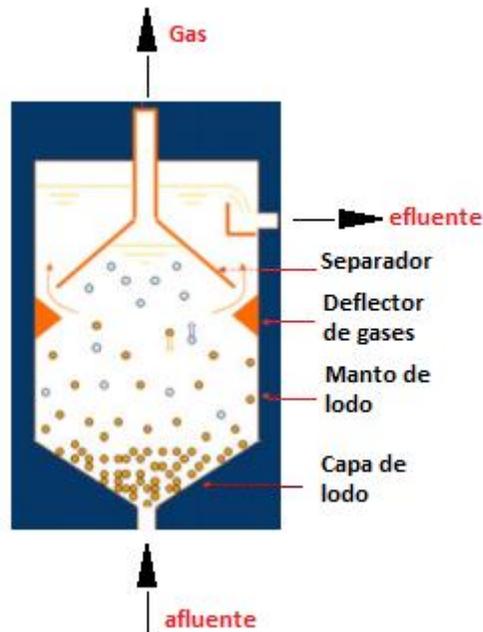


Figura 1. Reactor anaeróbico de flujo ascendente.

Modificado de: Observatorio del agua, 2015

Filtro percolador de flujo descendente: Es un sistema de tratamiento de agua que genera una especie de biopelícula en condiciones aerobias. Consiste en pasar el agua residual desde la parte superior del filtro sin inundar, a través de un material de relleno sobre el que crecen los microorganismos, que forman una biopelícula de espesor variable, normalmente de algunos milímetros. El crecimiento progresivo de esta provoca su desprendimiento y arrastre con el agua tratada.

Para separar el agua filtrada del exceso de biopelícula es necesario un proceso de sedimentación posterior. Requiere, además, de un mantenimiento en el cual se remueva parcialmente la biopelícula, considerando el tiempo que tarda en regenerarse hasta cierto espesor. (Observatorio del agua, 2015)

El filtro percolador funciona como un sistema aerobio de flujo descendente en el que el agua ingresa por los tubos de distribución en la parte superior, posteriormente desciende a través del medio de soporte, hacia el sistema de drenaje inferior para un posterior tratamiento en un sedimentador secundario, en la Figura 2 y la Figura 3 se aprecian los componentes de un filtro percolador.

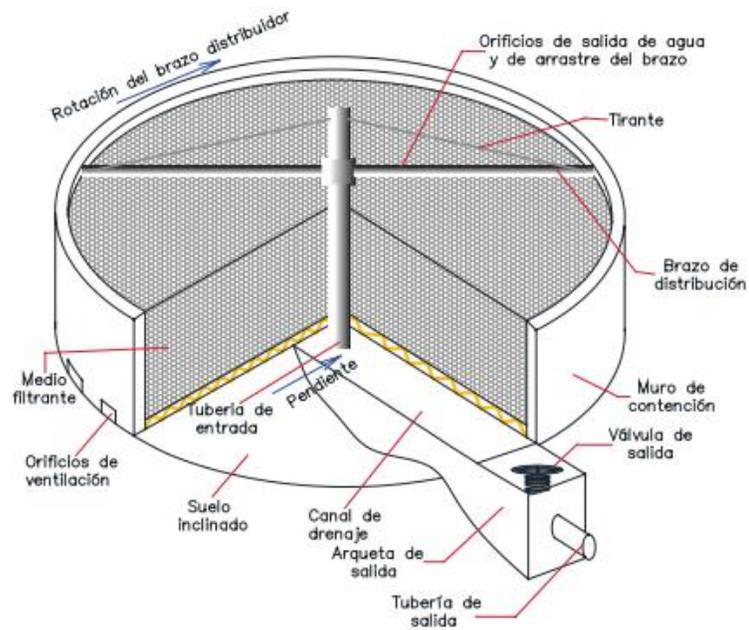


Figura 2. Esquema de los componentes de un filtro percolador

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2016

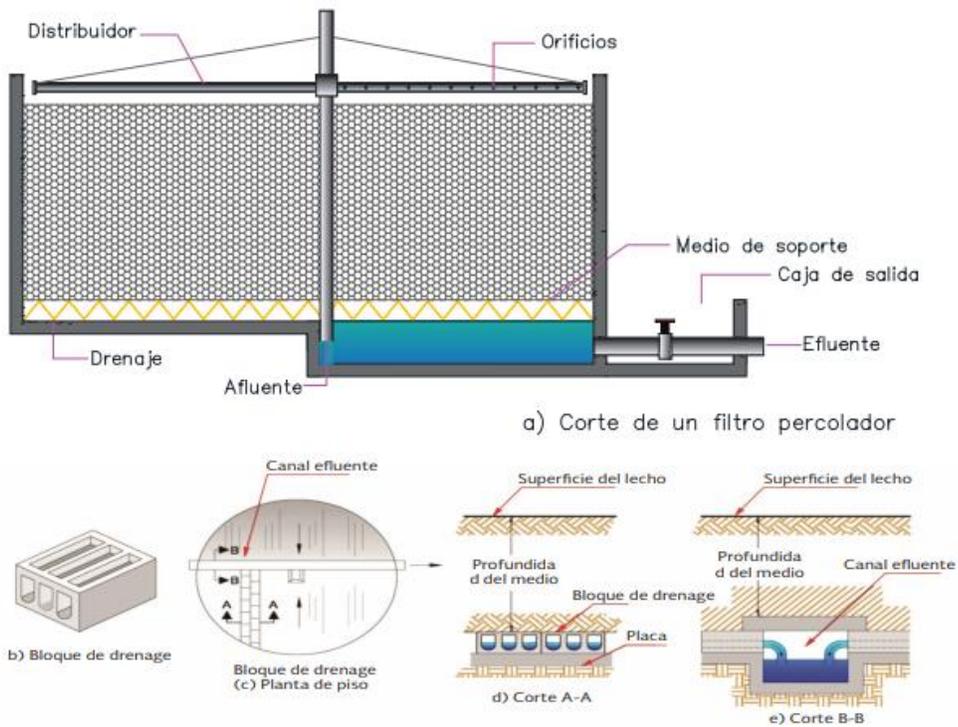


Figura 3. Vista de perfil de los componentes de un filtro percolador

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2016

El tratamiento de aguas residuales con filtro percolador es un proceso de oxidación bioquímica, al ser un sistema aerobio también se emplea para eliminar el nitrógeno amoniacal del agua residual. Se han apreciado resultados de la nitrificación con los medios de soporte más comunes de roca y plásticos, estos últimos también son empleados con el fin de eliminar simultáneamente la DBO y el Nitrógeno Total Kjeldahl.

El medio de soporte más común es el de piedra quebrada, que se usa por su bajo costo y fácil implementación, para obtener mejores resultados es conveniente que el material cumpla con ciertas condiciones, como poseer un tamaño uniforme y asegurar un volumen de vacíos adecuado para el paso del agua y el flujo de aire para la generación de bacterias aerobias.

El tamaño efectivo de la roca oscila entre los 75 mm a 125 mm, esto debido a que diámetros menores reducen el contenido de vacíos y diámetros mayores no poseen el área superficial suficiente para el desarrollo de la biopelícula, a mayor cantidad de espacios vacíos permite mayor carga hidráulica y mejora la transferencia de oxígeno.

Otras propiedades esperadas en el material de soporte son: ausencia de finos, insolubilidad, resistencia química al agua residual, resistencia al intemperismo inmunidad a ataques bacterianos y degradación por rayos ultravioleta. (Comisión Nacional del Agua, 2016)

*Reactor de esponjas colgantes de flujo descendente DHS (Downflow hanging sponges):* "Por su ahorro en el consumo de energía y costos de mantenimiento, este sistema se planteó como una alternativa para aplicar en países en desarrollo. Consiste en el uso de esponjas de poliuretano como un medio de soporte y de crecimiento para la biomasa que se desarrolla a partir de la circulación continua de las aguas residuales. Esta biomasa o película biológica es la responsable de la depuración del agua residual por mecanismos biológicos, físicos y químicos. El principio del uso de esponjas como lecho de crecimiento de la biomasa se basa en la porosidad del material que le proporciona una mayor superficie de contacto y de oxigenación al proceso de tratamiento. De esta manera se consiguen mayores periodos de retención y se **evita el uso de fuentes externas de energía para la aireación.**" (Ossio & Acuña, 2013)

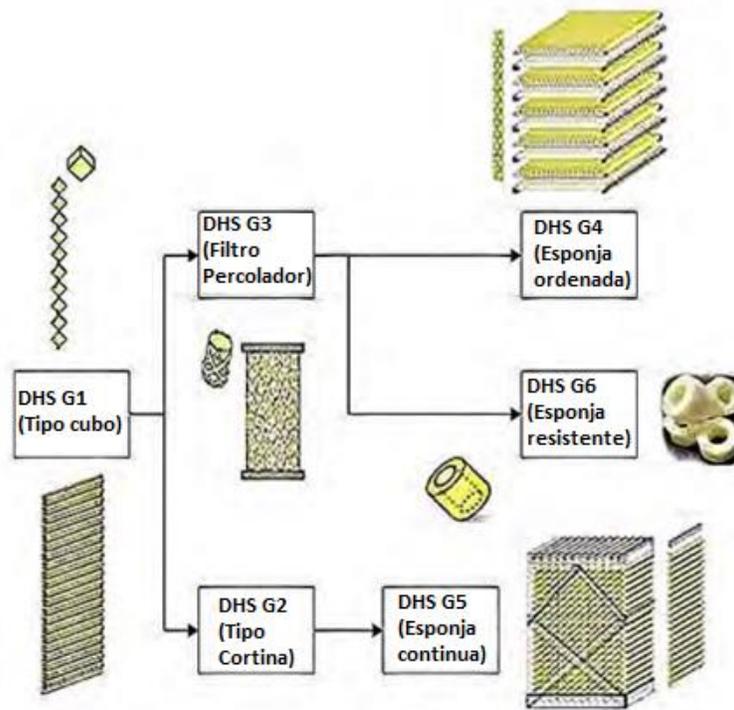


Figura 4. Evolución a del sistema DHS.  
Modificado de: Ossio & Acuña, 2013

#### 2.2.4 Tratamiento terciario

La finalidad de este tipo de tratamiento es la remoción de la carga orgánica residual y aquellas sustancias que no son removidas por medio de los tratamientos secundarios, como los nutrientes nitrógeno y fósforo.

Estos procesos son de naturaleza biológica o físico-química como lo son la coagulación-floculación, la decantación, siendo estos tratamientos físico-químicos. También, dentro de estos tratamientos se localizan las resinas de intercambio de iones, adsorción por carbón activado, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodesinfección, membranas de cerámica, desinfección ultravioleta, entre otros. Estos procesos suelen tener grandes eficiencias de remoción; pero a la vez implican costos de operación y mantenimiento mayores a los tratamientos primarios y secundarios. (Cyclus, 2002)

### 2.3. PARÁMETROS DE CONTROL DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): La DBO es la cantidad de oxígeno en mg/L necesaria para descomponer la materia orgánica presente en aguas contaminadas por acción bioquímica

aerobia (en presencia de oxígeno). Esta demanda de oxígeno la ejercen tres clases de compuestos: carbonados, nitrogenados y algunos compuestos químicos reductores.

La transformación biológica de la materia orgánica se realiza en dos etapas: en la primera, se oxidan principalmente los compuestos carbonados y en la segunda los nitrogenados. La primera etapa comienza inmediatamente y acaba aproximadamente cuando pasan 21 días si la temperatura se ha mantenido a 20 °C. La segunda, no empieza hasta que no acaba la primera y se prolonga durante un periodo más largo. El punto final puede llegar al cabo de mucho tiempo. Para poder estandarizar la medición de este parámetro, se utiliza un periodo de incubación de 5 días a 20 °C, llamado DBO<sub>5,20</sub>.

El cálculo de la DBO<sub>5,20</sub> se efectúa midiendo el contenido de oxígeno de una muestra determinada después colocarla en una incubadora durante 5 días a 20 °C utilizando como recipientes botellas cerradas sin contacto con el aire.

El valor de DBO es útil para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requiere para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente en las aguas residuales, para dimensionar los sistemas de tratamiento de agua, para medir la eficiencia de algunos procesos y para controlar el cumplimiento de los valores límites a las que están sujetas los vertidos, según los reglamentos nacionales. (Martínez, 2010)

*Demanda Química de Oxígeno (DQO):* Es la cantidad de oxígeno en mg/L necesario para oxidar por vía química el material orgánico presente en las aguas residuales. Para obtener el valor de DQO se utiliza un agente químico oxidante, como el dicromato potásico y se coloca a elevadas temperaturas para obtener la reacción deseada.

La diferencia básica con el parámetro DBO recae en que hay más compuestos que se oxidan por vía química que por vía biológica. Por ello, los valores de la DQO serán razonablemente más altos que los de la DBO, hasta tal punto que se puede establecer una relación directa entre ambos parámetros; esto permite estimar un contenido de DBO en un tiempo de solo dos horas (tiempo que dura el ensayo de la DQO) frente los 5 días que dura el ensayo de DBO.

Dependiendo del valor obtenido de la relación de estos dos parámetros se puede apreciar cual tipo de contaminación abunda más en el agua residual, entre menor sea la relación indica mayor presencia de compuestos de oxidación química, mientras que valores de relación mayores señala la presencia de compuestos que se degradan por oxidación biológica, en el

Cuadro 2, se pueden apreciar los rangos de relación para identificar el tipo de contaminación presente en el agua. (Martínez, 2010)

Cuadro 2. Tipo de contaminación con respecto a la relación de DBO/DQO

| <b>Relación</b>  | <b>Tipo de contaminación</b> |                      |                          |
|------------------|------------------------------|----------------------|--------------------------|
|                  | <b>Poco biodegradable</b>    | <b>Biodegradable</b> | <b>Muy biodegradable</b> |
| $DBO_{5,20}/DQO$ | < 0,2                        | 0,2 - 0,4            | > 0,4                    |

Fuente: Martínez, 2010

En el Cuadro 3 se presentan los valores de composición del agua residual doméstica para los parámetros de DBO y DQO.

Cuadro 3. Composición de aguas residuales domésticas

| <b>Componente</b> | <b>Fuerte</b> | <b>Media</b> | <b>Débil</b> |
|-------------------|---------------|--------------|--------------|
| DBO               | 400           | 220          | 110          |
| DQO               | 1000          | 500          | 250          |

Modificado de: Metcalf & Eddy, 1985

Nitrógeno y fósforo: son los elementos nutritivos necesarios para el crecimiento biológico. Si el contenido es insuficiente, como en ciertas aguas residuales industriales, será necesario añadirle para hacer tratables estas aguas. Por el contrario, un contenido demasiado elevado de P y N en forma de nitratos, da lugar a la proliferación de ciertos hongos y algas, cosa indeseable para conseguir un agua bien depurada.

El nitrógeno se puede presentar en forma orgánica, amoniacal, en nitritos y nitratos. El primero se determina con el ensayo de nitrógeno kjehdahl. Como el ensayo nitrógeno kjehdahl total, determina tanto el contenido orgánico como amoniacal, la combinación de los dos métodos permite determinar el nitrógeno amoniacal. Los nitritos, aunque se encuentren en baja concentración (1 mg/l máximo) son tóxicos para la mayoría de la vida acuática. Los nitratos están limitados a 45 mg/l en los afluentes secundarios para recargar las aguas subterráneas. Esto es debido a que los nitratos, al pasar a nitritos reducen la capacidad de transporte de O<sub>2</sub> en sangre y supone graves consecuencias en la salud de los niños.

El fósforo en soluciones acuosas se presenta como ortofosfatos, disponibles directamente para el metabolismo biológico como polifosfatos, la hidrólisis de los cuales da ortofosfatos y en fosfatos orgánicos, de poca importancia en residuos domésticos, pero sí en vertidos industriales y en fangos de aguas residuales domésticas.

La presencia de estos elementos en cuerpos de agua superficiales como lo son ríos, lagos y mares, puede provocar efectos adversos en los ecosistemas, como la proliferación de algas y plancton, la descomposición de las cuales implica consumo de oxígeno y la consecuente muerte y abandono de muchas especies acuáticas. (Martínez, 2010)

La ausencia de fósforo es más importante que la del nitrógeno para limitar el crecimiento de las algas planctónicas, capaces de fijar el nitrógeno atmosférico. Para establecer un valor aproximado del fósforo presente en aguas residuales, se realiza una relación con la  $DBO_{5,20}$  de manera que los rangos de  $P/DBO_{5,20}$  usualmente varían del 3,2 % al 6,6 %, en el caso de aguas residuales con predominio en zonas urbanas.

Un valor de referencia aceptable de esta relación es de 4,5 %, dato que se puede utilizar en ausencia de valores más precisos. En consecuencia, la carga de fósforo aportada por habitante podemos estimarla entre 3,0 y 4,0 g/día. (Ronzano & Dapena, s.f.)

Potencial de hidrógeno (pH): La concentración de ion hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. El intervalo de concentraciones adecuado para la adecuada proliferación y desarrollo de la mayor parte de la vida biológica es bastante estrecho y crítico. El agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en las aguas naturales si ésta no se modifica antes de la evacuación de las agua. (CIDTA)

Para asegurar que este parámetro no afecte a biodiversidad alterando los niveles de acidez del cuerpo de agua receptor se establece un rango permisible cercano al valor neutro, que corresponde a un pH de 7, también es importante que este parámetro se conserve en los sistemas de tratamiento para las aguas residuales, ya que de no ser así afecta el desarrollo de las bacterias aerobias y anaerobias indispensables para el tratamiento biológico del agua.

Conductividad: Mide las cargas iónicas presentes en el agua, entre los iones más habituales se encuentran: el sodio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloruro, entre mayor es el valor de conductividad representa mayores concentraciones iónicas. Entre mayor sea la cantidad de sólidos disueltos aumenta la conductividad.

El verter aguas residuales a los cuerpos de agua, aumenta la concentración de iones presentes en estos, además el incremento de la salinidad presenta efectos negativos sobre el ecosistema

fluvial, llegando a reducir fuertemente la biodiversidad. (Consejería de vivienda, obras públicas y vertebración del territorio)

Oxígeno disuelto (OD): **“Es la medida de la concentración de oxígeno en el agua, usando como referencia el 100 % de saturación de oxígeno en el aire”.**

La presencia de oxígeno disuelto en el agua afecta los procesos de tratamiento, en el caso de tratamientos aerobios, se espera la presencia de oxígeno constante; mientras que en los tratamientos anaerobios, se requiere la ausencia de este para su correcto funcionamiento.

Para el caso del agua ya tratada para ser vertida en los cuerpos de agua, la presencia de oxígeno disuelto es indispensable para no afectar los procesos biológicos que se dan en el medio acuático al disminuir la disponibilidad de oxígeno para los organismos vivos. (Consejería de vivienda, obras públicas y vertebración del territorio)

Temperatura: La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua de suministro, hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales.

El oxígeno es menos soluble en agua caliente que en agua fría. El aumento en las velocidades de las reacciones químicas que produce un aumento de la temperatura, combinado con la reducción del oxígeno presente en las aguas superficiales, es causa frecuente de agotamiento de las concentraciones de oxígeno disuelto durante los meses de verano.

Un cambio brusco de temperatura puede conducir a un fuerte aumento en la mortalidad de la vida acuática. Además, las temperaturas anormalmente elevadas pueden dar lugar a una indeseada proliferación de plantas acuáticas y hongos. (CIDTA)

En el Cuadro 4, se presentan los rangos de temperatura según los cuales aparecen diferentes efectos en los procesos biológicos de tratamiento.

Cuadro 4. Efectos de la temperatura del agua residual en los procesos biológicos

| <b>Temperatura</b>                | <b>Efectos en el agua residual</b>                               |
|-----------------------------------|--|
| $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  | Dejan de actuar hasta las bacterias quimiheterótrofas            |
| $\leq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  | Dejan de actuar las bacterias nitrificantes                      |
| $\leq 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Las bacterias productoras de metano cesan su actividad           |
| 25°C - 35°C                       | Temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana |
| $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$    | Se detienen la digestión aerobia y procesos de nitrificación     |

Modificado de: CIDTA

Sólidos suspendidos totales (SST): Corresponden a la fracción de los sólidos totales que son retenidos en un filtro con un tamaño de poro específico (12 a 15 micras) medido después de que ha sido secado a una temperatura específica (105 °C). (López, Martínez, & García, 2014)

Para este proceso de separación suele emplearse un filtro de fibra de vidrio, aunque también se puede usar un filtro de membrana de policarbonato. Los resultados obtenidos con cada tipo de filtro pueden presentar diferencias, achacables a la diferente estructura de los mismos.

Los SST están conformados por los sólidos coloidales y los sólidos disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0,001 y 1 micrómetro y no es posible eliminarla por medio de sedimentación, por lo que para su extracción se utilizan métodos como la oxidación biológica o la coagulación. Los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas y además por iones en disolución. (CIDTA)

Sólidos suspendidos volátiles (SSV): Son los sólidos que pueden ser volatilizados e incinerados cuando los sólidos suspendidos totales son calcinados a una Temperatura de  $500 \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la concentración de sólidos volátiles se suele considerar como una medida aproximada del contenido de materia orgánica.

La principal naturaleza de los sólidos suspendidos es orgánica; además estos están formados por algunos de los materiales más objetables contenidos en el agua residual. Se atribuye que a mayor parte de los sólidos suspendidos en el agua residual son desechos humanos, como desperdicios de alimentos, papel, trapos, entre otros residuos. Que llegan a formar una masa de sólidos suspendidos en el agua. (López, Martínez, & García, 2014)

Sólidos sedimentables (SSED): Los sólidos sedimentables se definen como aquellos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables, expresados en unidades de mL/L,

constituyen una medida aproximada de la cantidad de fango que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual. (CIDTA)

#### **2.4. TRATAMIENTO AEROBIO**

Los microorganismos transportados por la materia orgánica en el agua ejecutan un proceso de oxidación utilizando oxígeno molecular como aceptor de hidrógeno (formando de este modo  $H_2O$ ). Generalmente el sistema se identifica por la presencia de microorganismos o biomasa de película fija o adherida (filtros percoladores, D.H.S., y disco biológico rotativos) y de crecimiento suspendido como: lodos activados, filtros percoladores, zanjas de oxidación y lagunas aireadas. (Rodríguez, 2017)

#### **2.5. TRATAMIENTO ANAEROBIO**

Es un proceso en el cual las bacterias se fermentan por medio de la materia orgánica cuando esta se descompone, en ausencia de oxígeno disuelto, lo que produce una mezcla de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ), en donde participan cuatro familias de bacterias básicas: bacterias hidrolíticas, bacterias acetogénicas, bacterias metanogénicas y bacterias homoacetogénicas; sin embargo, frecuentemente se habla de dos grandes grupos de bacterias.

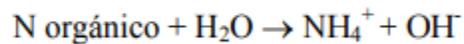
El primer grupo es de bacterias anaerobias y facultativas que hidrolizan y fermentan los compuestos orgánicos complejos a ácidos simples y se les llama bacterias formadoras de ácidos. El segundo grupo, convierte el producto anterior en gas metano, hidrógeno sulfurado y bióxido de carbono. (Rodríguez, 2017)

#### **2.6. NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN**

La nitrificación es un proceso autotrófico en el cual la energía necesaria para el crecimiento bacteriano se obtiene de la oxidación de compuestos de nitrógeno, principalmente del amoníaco. Para lograr la síntesis de células nuevas, los organismos nitrificadores emplean dióxido de carbono; pero la producción de masa celular por organismos nitrificadores es inferior a la producción por organismos heterótrofos.

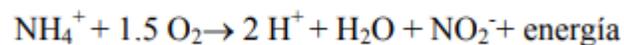
Para lograr el proceso de nitrificación se inicia con la oxidación del amonio, que es un proceso que se realiza en dos etapas, en el que toman parte dos familias de microorganismos, Nitrosomonas y Nitrobacter. Las bacterias nitrificantes oxidan el amonio que se encuentra inicialmente en el agua residual y es posteriormente liberado por las reacciones heterotróficas.

Inicialmente el nitrógeno se hidroliza en la red de colectores y en las depuradoras, y pasa a amonio, como se muestra en la siguiente ecuación:



Posteriormente se inicia la fase de la oxidación de amonio a nitrato el cual consta de dos etapas:

- Oxidación de amonio a nitrito por Nitrosomas:



- Oxidación de nitrito a nitrato por Nitrobacter:



Normalmente la reacción de formación de nitritos es más lenta que la de formación de nitratos, estas operaciones son estrictamente aerobias y se considera que para concentraciones de oxígeno disuelto inferiores a 2 mg/L la velocidad de crecimiento se reduce significativamente.

La desnitrificación biológica es un proceso de dos etapas que requiere nitrificación en un ambiente aerobio seguido de desnitrificación en un ambiente anóxico. Como todas las reacciones biológicas, éstas son afectadas por condiciones específicas en el reactor, que incluyen el pH, la temperatura del agua, la concentración de oxígeno disuelto, el tipo de sustrato y su concentración, y la presencia o ausencia de sustancias tóxicas inhibidoras.

Al realizar este proceso, en el sistema de tratamiento se producen tres tipos de reacciones biológicas: La oxidación heterotrófica de la materia orgánica, que consiste en el tratamiento de las bacterias aerobias que utilizan el oxígeno como aceptor final de electrones, esta reacción aporta energía que es utilizada para producir más bacterias; la segunda reacción necesaria es la nitrificación, que también es aerobia, y finalmente se produce la desnitrificación en un ambiente anaerobio por lo que usa el nitrato en lugar de oxígeno como aceptor final de electrones. (Suárez & Jácome, 2007)

## **CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS**

Para el desarrollo del proceso de investigación se siguió una metodología que se dividió en cinco etapas: investigación bibliográfica, caracterización de las condiciones actuales de la planta, obtención de valores de los parámetros de los sistemas de forma individual por experimentación, revisión del diseño existente de los sistemas de tratamiento UASB y filtro percolador y finalmente el análisis de los datos obtenidos para la obtención de conclusiones y elaboración de recomendaciones.

Para el desarrollo experimental se detallan más adelante los procedimientos y equipos utilizados, así como las condiciones de toma de muestras y los puntos de muestreo seleccionados para el análisis

### **3.1 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA**

#### **3.1.1 Etapa de investigación bibliográfica**

En esta etapa se revisaron diferentes fuentes con parámetros de diseño para el filtro percolador y el reactor anaerobio de flujo ascendente, también se revisaron los datos históricos facilitados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados para la realización del análisis para el comportamiento de la planta a través del tiempo.

Además, se investigó acerca de las características físicas del lugar en el que se ubica la planta de tratamiento, como topografía, clima, temperatura y demás variables que pueden incidir tanto en el diseño de la planta como en los resultados de los parámetros experimentales de verificación.

También se realizó una revisión del Reglamento de Reúso y Vertido de Aguas Residuales No.33601 y el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales No.31545 vigentes para la obtención de los límites establecidos para los diferentes parámetros de medición, separación de los linderos e identificación de tuberías.

### **3.1.2 Caracterización de la condición actual de la PTAR de Santa Cecilia**

Se establecieron fechas para llevar a cabo una serie de visitas a la planta de tratamiento, inicialmente se realizó una valoración superficial de las condiciones de funcionamiento de acuerdo con las características observadas en el sitio.

Se tomaron medidas de los sistemas existentes que posteriormente se compararon con los planos facilitados por AyA, para verificar que coincidieran con estos.

Se utilizaron mapas obtenidos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) para obtener las características físicas del sitio en que se encuentra ubicada la planta.

Características de la red y población

Se describieron las condiciones que presentan los sistemas existentes y su funcionamiento con respecto a lo que indica el manual de operación de la planta suministrado por AyA.

Se comparó la frecuencia de operación y mantenimiento de los sistemas sugeridas en el manual de operación y en el Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales No. 33601 con las frecuencias reales con que se realizan.

Se midieron las dimensiones externas de los sistemas de tratamiento, los diámetros de las tuberías en la entrada y salida del reactor UASB para verificar si cumplían con las especificaciones de diseño, se revisó que cumpliera la distancia reglamentaria entre cada elemento de la planta y los linderos de la propiedad y se observó si las tuberías externas cumplían o no con el código de colores del Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Se comprobó la existencia de la bitácora operacional que se maneja en la planta para la medición de los parámetros de caudal, potencial de hidrógeno, sólidos sedimentables, oxígeno disuelto y temperatura.

Se observó y se preguntó a los encargados de la planta, acerca de la frecuencia de limpieza de los sistemas como la caja de rejillas, válvulas de purga, sedimentadores, canoas del reactor UASB, filtro y lecho de secado y la manera de ejecución de los mismos debido a que no existe un protocolo establecido.

### **3.1.3 Obtención de valores medidos de forma experimental de muestras puntuales obtenidas de la PTAR de Santa Cecilia**

Se realizaron siete muestreos del agua de la planta de forma semanal, y se fueron procesando conforme se llevaban al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UCR, con excepción de los días en que el laboratorio no se encontraba en servicio. A las muestras obtenidas de seis puntos específicos previamente seleccionados para su respectivo análisis, se les realizan una serie de pruebas para obtener los valores de DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, sólidos volátiles, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fósforo, temperatura, conductividad, potencial de hidrógeno y oxígeno disuelto.

Se seleccionaron los materiales, equipos y procedimientos requeridos para obtener los valores necesarios para hacer el análisis de la calidad del agua residual doméstica.

### **3.1.4 Revisión del diseño de los sistemas de tratamiento existentes UASB y filtro percolador**

Se utilizaron los valores medidos de forma experimental en cada uno de los sistemas, las dimensiones obtenidas por medición en campo, complementando con las suministradas en los planos y los parámetros medidos en campo para la comparación con los valores de diseño teóricos recomendados, obtenidos mediante la investigación bibliográfica y la participación en el curso suministrado por Carlos Chernicharo sobre reactores anaerobios de flujo ascendente (UASB).

Se revisó la eficiencia de cada uno de los sistemas para verificar si cumplen los valores de remoción esperados, a partir de los datos de entrada y salida de cada uno de los sistemas y comparando con los valores experimentales que se esperan según las condiciones de diseño.

### **3.1.5 Análisis de los datos facilitados por AyA y los obtenidos en el laboratorio para verificar cumplimiento del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.**

Se realizaron los análisis de los datos de sólidos sedimentables, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, nitrógeno, fósforo, coliformes fecales, DBO y DQO suministrados por AyA y los obtenidos de forma experimental: sólidos totales, sólidos volátiles, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, nitrógeno,

fósforo, DBO y DQO. Se realizó posteriormente una comparación de los resultados de las pruebas comunes con el objetivo de verificar la confiabilidad de los datos obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UCR y para las pruebas que no contaban con registros históricos, se hizo el análisis únicamente con los valores obtenidos.

Se revisaron los cumplimientos de los parámetros con respecto a los límites establecidos para los mismos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales No. 33601.

Finalmente se obtuvieron conclusiones a partir de los resultados generados y su respectivo análisis, y a partir de estas se realizaron recomendaciones para mejorar las condiciones de operación y mantenimiento y la implementación de sistemas que complementen el funcionamiento de la planta.

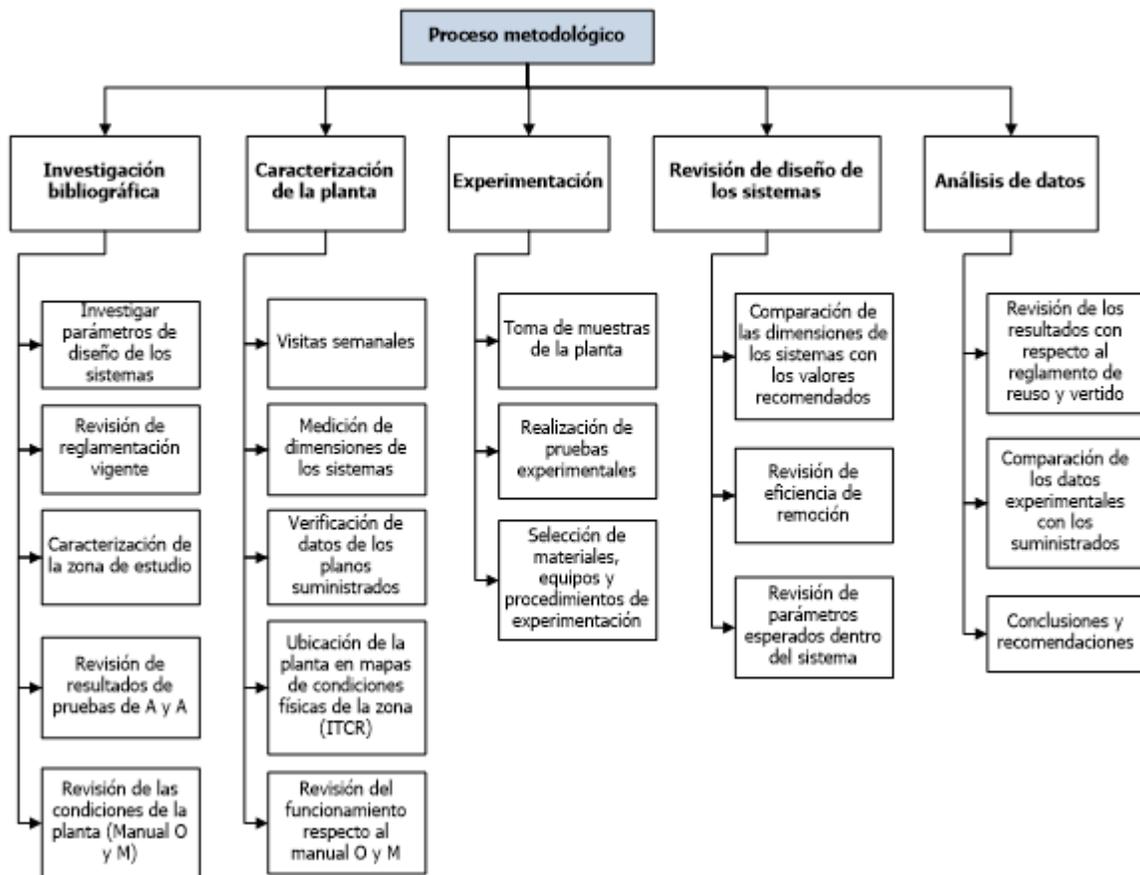


Figura 5. Esquema metodológico establecido para el desarrollo del proyecto de investigación.

### **3.2 CONDICIONES DE MUESTREO**

Para la selección de los puntos de muestreo se tomó en consideración el análisis individual que se requería realizar para cada sistema, por lo tanto, se eligieron puntos de fácil acceso localizados antes y después de estos.

Se dividieron las localizaciones dependiendo si los parámetros se medían en campo o se requería de la toma de muestra para su posterior procesamiento; para los primeros, se seleccionaron puntos en los cuales se permitiera la colocación del medidor multiparámetros, que son puntos en los que se pueda retener agua para la sumersión del aparato. En el caso de los segundos, se eligieron puntos en los cuales se pudieran obtener muestras representativas, antes y después de los sistemas a analizar para poder obtener las eficiencias de remoción reales.

Los puntos de muestreo, así como la distribución de los sistemas en la planta se pueden observar en la Figura 6. Los puntos identificados con números son los sitios de toma de muestras para el procesamiento en el laboratorio; mientras que los puntos identificados con letras representan la localización de las pruebas tomadas en campo.

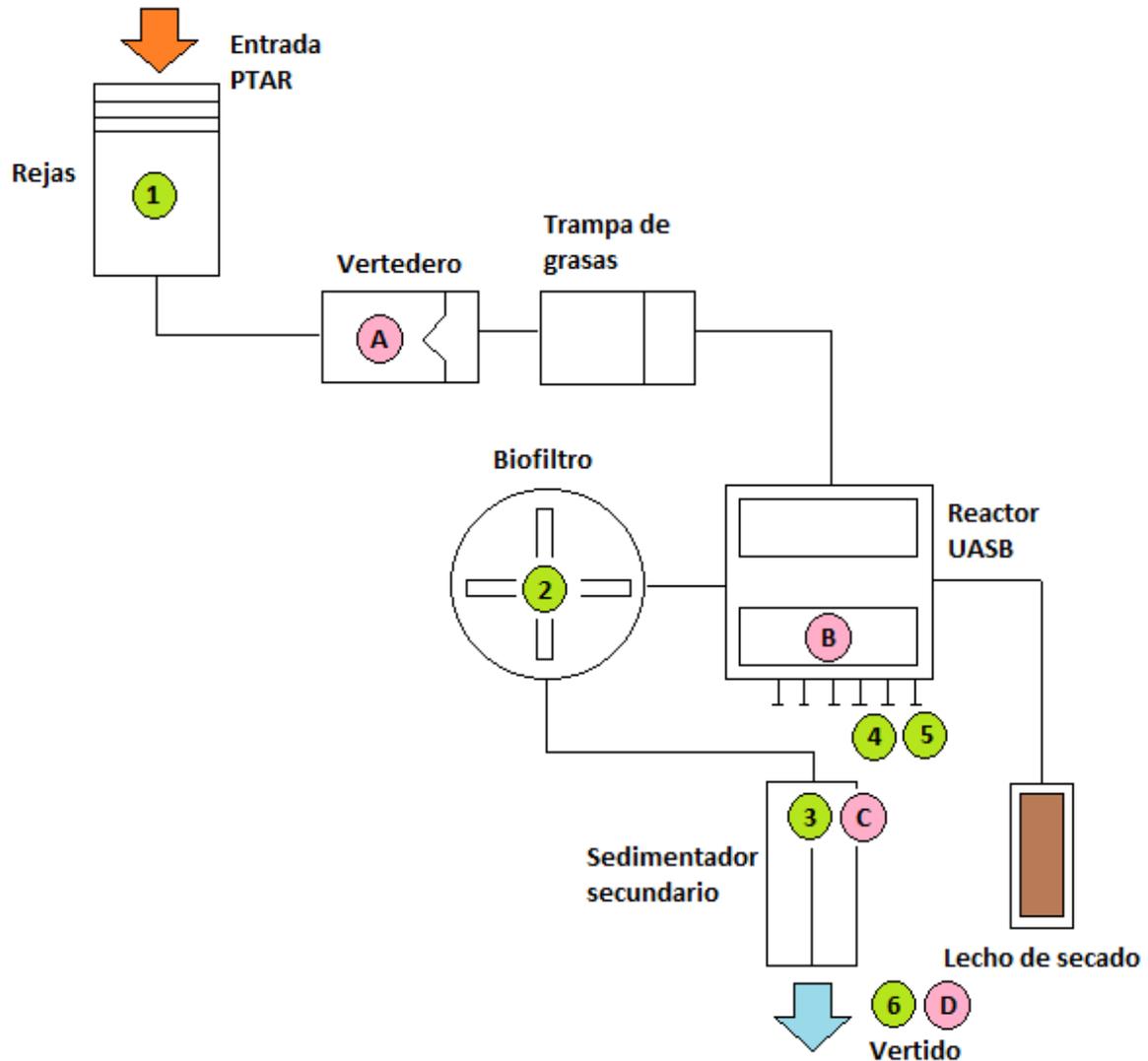


Figura 6. Diagrama de flujo de la planta de Santa Cecilia y localización de los puntos de muestreo.

### **Selección de puntos de muestreo**

*Punto 1:* Entrada a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de Santa Cecilia

Este punto se escogió tanto para obtener los valores de entrada en el UASB y que a la vez sirviera como punto de comparación con los valores de entrada a la planta suministrados por AyA en años previos.

El punto seleccionado se puede observar en la Figura 7, ubicado en la caja de rejas, la muestra se obtiene directamente de la tubería de entrada.



Figura 7. Punto de muestreo 1, caja de rejas.

*Punto 2:* Entrada al filtro percolador (rociador)

Esta muestra se obtuvo de los agujeros distribuidos en los tubos de entrada que se pueden observar en la Figura 8, para facilitar la toma de la muestra, se detenía el sistema que trabaja manteniendo un movimiento giratorio constante.

El propósito de la muestra en este punto es evaluar las condiciones del agua antes de pasar por el filtro percolador y que, a la vez, son las mismas condiciones de salida del reactor UASB.



Figura 8. Punto de muestreo 2, entrada al filtro percolador y salida del UASB.

*Punto 3: Salida del filtro percolador (rociador)*

Esta muestra se obtuvo en la entrada al sedimentador secundario, debido a que entre este punto y la salida directa del filtro no se ubica ningún sistema de tratamiento se supone, para efectos de análisis, que las características son las mismas; el punto de muestreo se puede ver en la Figura 9.

El propósito de la muestra en este punto es evaluar las condiciones del agua después de pasar por el filtro percolador y poder obtener la eficiencia real relacionada al proceso.



Figura 9. Punto de muestreo 3, salida del filtro percolador.

*Puntos 4 y 5:* Salida de las válvulas de inspección del reactor UASB

Estas muestras se obtuvieron directamente de las salidas de las válvulas, el reactor UASB cuenta con seis válvulas en total; pero únicamente se pudieron obtener muestras de las 2 válvulas superiores, debido a que las otras estaban colmatadas.

El propósito de la muestra en estos puntos es verificar el funcionamiento del manto de lodos en la parte inferior del reactor, medir la concentración de nutrientes como nitrógeno y fósforo y usarlos para obtener medición de gases en el reactor anaerobio del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica.

Para efectos de análisis las válvulas fueron nombradas como válvula 5 y válvula 6; siendo esta última la válvula superior. En la Figura 10 se puede identificar la locación de cada una de estas.



Figura 10. Puntos de muestreo 4 y 5, válvulas de inspección del reactor UASB.

*Punto 6:* Vertido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de Santa Cecilia

Este punto se escogió para obtener los parámetros de calidad de agua del vertido al cuerpo de agua superficial, que son a la vez los valores que determinan si la planta cumple o no con el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales No.33601. También sirve como punto de comparación con los valores de salida suministrados por AyA en años previos.

Esta muestra se obtiene de la salida del tubo que se observa en la Figura 11; después de este punto el agua es trasladada hasta el cuerpo de agua donde representa un foco de contaminación puntual.



Figura 11. Punto de muestreo 6, vertido de la planta.

### 3.3 CONDICIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA

#### 3.3.1 Parámetros utilizados para el diseño de los sistemas

En el Cuadro 5 se presentan las condiciones de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Santa Cecilia, Puriscal que vienen en el Manual de Operación, esto debido a que no existen registros de los cálculos realizados para el diseño de los componentes de la planta.

Cuadro 5. Condiciones de diseño de los sistemas de la planta de tratamiento de Santa Cecilia

| <b>Condiciones de diseño</b>                            |  |       |
|---|--|-------|
| Volumenes de diseño y capacidad de la planta            | Caudal promedio diario (m <sup>3</sup> /día) | 64,8  |
|   | Caudal promedio horario (m <sup>3</sup> /h)  | 6,07  |
| Carga orgánica de diseño para agua cruda                | DBO (mg/L)                                   | 300   |
|   | DOO (mg/L)                                   | 435   |
|   | SST (mg/L)                                   | 250   |
| Cargas orgánicas totales para el caudal promedio diario | C org [DBO] (Kg DBO/día)                     | 19,44 |
|   | C org [DOO] (Kg DOO/día)                     | 28,19 |
|   | C org [SST] (Kg SST/día)                     | 16,20 |

Fuente: Badilla, 2012

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de los monitoreos rutinarios en la planta de tratamiento, para el control operacional.

Cuadro 6. Parámetros de control que se miden en la planta de forma rutinaria en el vertido de la planta.

| Descripción                  | Cantidad de veces | Promedio | Desviación Estándar | Mínimo | Máximo |
|------------------------------|-------------------|----------|---------------------|--------|--------|
| Temperatura                  | 82                | 22,51    | 11,34               | 18,70  | 25,90  |
| Caudal (m <sup>3</sup> /día) | 96                | 26,96    | 13,51               | 6,71   | 46,92  |
| Potencial de hidrógeno       | 82                | 7,71     | 3,85                | 6,95   | 8,60   |
| Sólidos sedimentables (mL/L) | 96                | 0,01     | 0,01                | 0,01   | 0,04   |

Modificado de: Acueductos y Alcantarillados, 2019

### 3.3.2 Tiempo de retención hidráulica en el UASB y en el filtro

El tiempo de retención hidráulica es un parámetro fundamental en el tratamiento de aguas residuales debido a que este permite la separación de los sólidos sedimentables, promueve la formación de las biopelículas en el material de soporte de los filtros, permite la acción de las bacterias aerobias y anaerobias en los sistemas para el mejoramiento de la calidad del agua, para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación para el reactor UASB:

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Siendo

V: Volumen total del reactor (m<sup>3</sup>)

Q: Gasto (m<sup>3</sup>/h)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (h)

Para el caso de la etapa de esponjas en el filtro percolador, se utiliza una variación con el volumen ocupado por las mismas y el caudal de entrada al sistema, que se va a considerar como los caudales suministrados por A y A, esto debido a que no se tiene medidor de caudal en el punto de entrada al filtro, esto se presenta en la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V_{esponja}(m^3)}{Q_{inicial}(m^3/h)}$$

Siendo

V<sub>esponja</sub>: Volumen de la capa de esponja (m<sup>3</sup>)

Q<sub>inicial</sub>: Gasto de entrada (m<sup>3</sup>/h)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (h)

Para el filtro de roca, se considera si hay presencia o no de limo, para esto se utilizan las siguientes dos fórmulas:

$$TRH = \frac{7}{6Q^{0.45}} \text{ (En presencia de limos)}$$

$$TRH = \frac{12}{60Q^{0.43}} \text{ (Sin presencia de limos)}$$

Siendo

Q: Gasto (m<sup>3</sup>/h)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (h)

Para este caso se va a considerar sin presencia de limos, según el material de soporte observado el cual no tiene presencia visible de limos.

Este valor se va a obtener para los caudales: máximo, mínimo y promedio que se manejan en la planta, que se encuentran en el Cuadro 6.

Para la obtención de los tiempos de retención hidráulica tanto para el filtro percolador como para el reactor UASB, en el Cuadro 7 se presentan las dimensiones de dichos sistemas para el obtener el volumen de los mismos.

Cuadro 7. Tiempos de retención hidráulica teóricos del reactor UASB y filtro percolador.

| <b>Sistema</b> | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Altura (m)</b> | <b>Área superficial (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b> | <b>TRH (h)</b> |
|----------------|---------------------------------|-------------------|---|--------------------------------|----------------|
| UASB           | 1,96                            | 4,0               | 6,996                                   | 27,984                         | 14,31          |
|                | 0,28                            |                   |   |                                | 100,09         |
|                | 1,12                            |                   |   |                                | 24,91          |
| Filtro roca    | 1,96                            | 1,8               | 2,545                                   | 4,581                          | 0,15           |
|                | 0,28                            |                   |   |                                | 0,35           |
|                | 1,12                            |                   |   |                                | 0,19           |
| Filtro esponja | 1,96                            | 0,6               | 2,545                                   | 1,527                          | 0,78           |
|                | 0,28                            |                   |   |                                | 5,46           |
|                | 1,12                            |                   |   |                                | 1,36           |

### 3.3.3 Carga volumétrica hidráulica y carga superficial hidráulica en el UASB y en el filtro

Para el cálculo de la carga volumétrica hidráulica se van a utilizar los valores de caudal promedio, máximo y mínimo medidos en la planta, para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$CHV = \frac{Q}{V} = \frac{1}{TRH}$$

$$CHS = \frac{Q}{A}$$

Siendo

V: Volumen total del reactor (m<sup>3</sup>)

Q: Gasto (m<sup>3</sup>/d)

A: Área (m<sup>2</sup>)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (d)

CHV: Carga volumétrica hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>\*d)

CHS: Carga superficial hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d)

Para la obtención de la carga volumétrica hidráulica en el reactor UASB, en el Cuadro 8 se presentan los valores requeridos para el cálculo y los resultados obtenidos.

Cuadro 8. Cargas volumétricas hidráulicas y cargas superficiales hidráulicas del reactor UASB y filtro percolador

| Sistema        | Caudal (m <sup>3</sup> / d) | TRH (d) | CHV (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> *d) | CHS (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d) |
|----------------|-----------------------------|---------|---|---|
| UASB           | 46,92                       | 0,596   | 1,677                                   | 6,707                                   |
|                | 6,71                        | 4,170   | 0,240                                   | 0,959                                   |
|                | 26,96                       | 1,038   | 0,963                                   | 3,854                                   |
| Filtro roca    | 46,92                       | 0,006   | 160,094                                 | 18,436                                  |
|                | 6,71                        | 0,014   | 69,372                                  | 2,637                                   |
|                | 26,96                       | 0,008   | 126,154                                 | 10,593                                  |
| Filtro esponja | 46,92                       | 0,033   | 30,727                                  | 18,436                                  |
|                | 6,71                        | 0,228   | 4,394                                   | 2,637                                   |
|                | 26,96                       | 0,057   | 17,656                                  | 10,593                                  |

### 3.3.4 Carga orgánica volumétrica en el UASB y el filtro

La carga orgánica volumétrica depende de la concentración de sustrato en el afluente, este valor se obtiene del Cuadro 5 y la capacidad del reactor UASB.

Para el cálculo de la carga orgánica volumétrica se van a utilizar los valores de caudal promedio, máximo y mínimo medidos en la planta, para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$COV = \frac{Q * S_0}{V}$$

Siendo

S<sub>0</sub>: Concentración de sustrato en el afluente (kg DQO/m<sup>3</sup>)

V: Volumen total del reactor (m<sup>3</sup>)

Q: Gasto (m<sup>3</sup>/d)

COV: Carga orgánica volumétrica (kg DQO/m<sup>3</sup>\*d)

Para la obtención de la carga orgánica volumétrica en el reactor UASB, en el Cuadro 9 se presentan los valores requeridos para el cálculo y los resultados obtenidos.

Cuadro 9. Cargas orgánicas volumétricas teóricas del reactor UASB y filtro percolador

| Sistema        | Caudal (m <sup>3</sup> /d) | So (kg DBO/m <sup>3</sup> ) | So (kg DQO/m <sup>3</sup> ) | Volumen (m <sup>3</sup> ) | COV (kg DQO/m <sup>3</sup> *d) | COV (kg DBO/m <sup>3</sup> *d) |
|----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| UASB           | 46,92                      |                             |                             |                           | 38,312                         | 28,788                         |
|                | 6,71                       | 17,17                       | 22,85                       | 27,984                    | 5,479                          | 4,117                          |
|                | 29,96                      |                             |                             |                           | 24,463                         | 18,382                         |
| Filtro roca    | 46,92                      |                             |                             |                           | 186,922                        | 28,883                         |
|                | 6,71                       | 2,82                        | 18,25                       | 4,581                     | 26,732                         | 4,131                          |
|                | 29,96                      |                             |                             |                           | 119,356                        | 18,443                         |
| Filtro esponja | 46,92                      |                             |                             |                           | 560,766                        | 86,650                         |
|                | 6,71                       | 2,820                       | 18,250                      | 1,527                     | 80,195                         | 12,392                         |
|                | 29,96                      |                             |                             |                           | 358,068                        | 55,329                         |

### 3.3.5 Velocidad de flujo ascendente en el UASB

La velocidad de flujo ascendente de los lodos afecta la separación de los diferentes estados dentro del reactor, para así evitar que los sólidos sedimentables se levanten y se mezclen con la fase líquida que pasa al filtro percolador.

Para el cálculo de la velocidad de flujo ascendente se van a utilizar los valores de caudal promedio, máximo y mínimo medidos en la planta, para obtener este valor se utiliza la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Siendo

A: Área superficial del reactor (m<sup>2</sup>)

Q: Gasto (m<sup>3</sup>/h)

v: Velocidad de flujo ascendente (m/h)

Para la obtención de la velocidad de flujo ascendente en el reactor UASB, en el Cuadro 10 se presentan los valores requeridos para el cálculo y los resultados obtenidos.

Cuadro 10. Velocidades de flujo ascendente teóricas del reactor UASB.

| <b>Sistema</b> | <b>Caudal (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>Área superficial (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Vel. Flujo ascendente (m/h)</b> |
|----------------|---------------------------------|---|------------------------------------|
|                | 1,96                            |   | 0,279                              |
| UASB           | 0,28                            | 6,996                                   | 0,040                              |
|                | 1,12                            |   | 0,161                              |

### 3.4 PRUEBAS DE LABORATORIO

#### 3.4.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Para la realización de estas pruebas se utilizaron dos equipos:

El equipo electrónico de la marca HACH modelo BODTrak (Figura 12), a cada botella se le colocan dos pastillas de Hidróxido de sodio, los resultados del equipo se recogen de forma manual a partir de los gráficos generados.



Figura 12. Equipo de medición de DBO marca HACH

El equipo digital de la marca VELP Scientifica (Figura 13), para la toma de datos se seleccionó la opción de medición del valor cada seis horas, el equipo genera un archivo compatible con Excel de manera que guarda los datos de todas las mediciones. Para la mayoría de las muestras se utilizó este equipo.

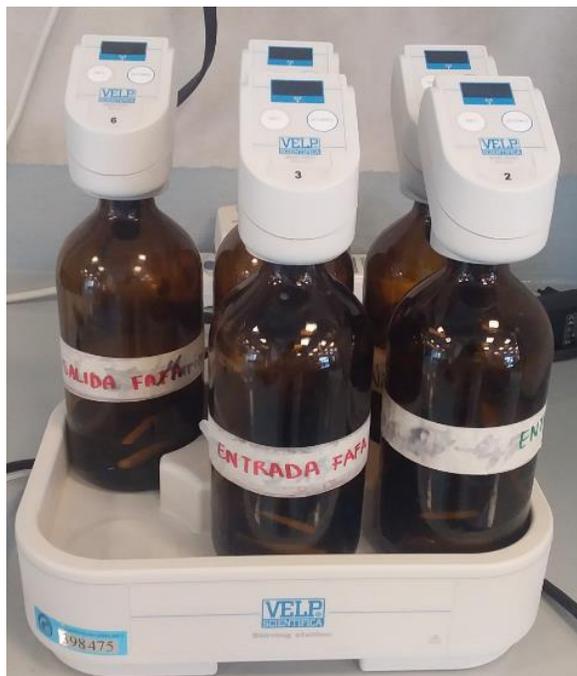


Figura 13. Equipo de medición de DBO marca VELP Scientifica

Ambos equipos se colocaron en una incubadora de la marca EQUATHERM para mantener las muestras a una temperatura constante de 20 °C.



Figura 14. Incubadora ambiental de muestras marca EQUATHERM

El proceso del análisis tiene una duración de cinco días y los recipientes se mantienen sellados para la conservación de la presión y en movimiento con ayuda de agitadores magnéticos.

Los métodos utilizados en el laboratorio son compatibles **con la norma internacional "5210B método respirométrico" perteneciente al "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"**.

Debido a que se presentó una diferencia significativa en los datos tomados con las dos máquinas, se realizaron pruebas de comparación de manera que se colocaron varias muestras de los muestreos 6 y 7 con el objetivo de comprobar los valores obtenidos en cada máquina conservando características similares, como el día en que se colocaron ambas muestras y la utilización de la misma incubadora.

Como resultado de esto, se obtuvieron los siguientes datos, a partir de los cuales se estableció que la relación entre ambas máquinas es de 5,2 para las muestras con concentraciones más bajas y 1,4 para las muestras con concentraciones más altas. Estos valores se obtuvieron a partir del valor de promedio entre los datos del muestreo 6 y el muestreo 7.

Además, comparando con los datos suministrados por AyA se mantienen los valores de la máquina HACH y ya que los datos históricos que ha suministrado la misma son confiables,

mientras que los de la máquina VELP Scientifica se multiplican por los factores de relación establecidos.

### 3.4.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Para la realización de esta prueba se utilizó el digestor de DQO de marca HACH (Figura 15) y se utilizaron viales de alto rango de 0 – 1500 (Figura 16), debido a las altas cargas que presentaban las mediciones.

Se colocan los viales en el digestor previamente preparado con una temperatura de 150 °C y se dejan reposar por dos horas, conservando la temperatura constante; al salir se dejan enfriar para realizar la medición.



Figura 15. Digestor de DQO utilizado para la realización de las pruebas.



Figura 16. Viales de alto rango para obtener el DQO en las pruebas

Para la toma de los valores de DQO se utilizaron dos colorímetros de marca HACH, los modelos utilizados corresponden a un DR 900 y un DR/890 (Figura 17). El uso de estos estaba limitado a la disponibilidad del equipo.

El método utilizado en el laboratorio es compatible con el "5220D método colorímetro" perteneciente al *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"*.



Figura 17. Colorímetros HACH implementados para la medición de los valores.

### 3.4.3 Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales

Para la obtención de los sólidos totales y sólidos suspendidos totales, se tomaron 100 mL de cada muestra; en el caso de totales se colocan en el horno directamente y en el caso de suspendidos totales se pasa por un filtro previamente y se colocan en el horno, se dejan secar por un periodo de 24 horas, luego se extraen del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente y se pesan.

El horno usado es de la marca EQUATHERM (Figura 18), que se mantiene constantemente a una temperatura de 105 °C, para la medición de la masa se usó una balanza de precisión marca ADAM (Figura 19), con una capacidad máxima de 300 g.

Para el caso de los sólidos suspendidos totales se utilizó un filtro micro poroso de la marca BOECO grado 1288 cualitativo con un poro de tamaño nominal de 12 a 15 micras, debido a que se agotaron los filtros, se sustituyeron por otros de la misma marca de grado 389 cuantitativos con el mismo tamaño de poro.

Los métodos utilizados son compatibles con el método 2540B para sólidos totales y el 2540D para sólidos suspendidos totales del "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*".



Figura 18. Horno de secado de sólidos de la marca EQUATHERM.



Figura 19. Balanza de precisión para medición de los pesos de los sólidos de la marca ADAM

### 3.4.4 Sólidos Volátiles

Para obtener el valor de los sólidos volátiles se obtienen primero los sólidos fijos, colocando los crisoles de porcelana con cada muestra en una mufla de la marca Analytical (Figura 20) la cual eleva la temperatura aproximadamente a 550°C por un periodo de dos horas. Posteriormente se utiliza una balanza de precisión, misma que se utilizó para los sólidos totales.

El método utilizado es compatible con el método 2540E para sólidos volátiles del *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"*.



Figura 20. Mufla utilizada para la obtención de los sólidos fijos de la marca Analytical.

### 3.4.5 Sólidos Sedimentables

Para la obtención de los sólidos sedimentables se utilizaron los conos Imhoff (Figura 21), los cuales son transparentes y tienen capacidad de un litro, durante el proceso de la prueba se tomaron cada cinco minutos los valores de sedimentación por un periodo de una hora para obtener los valores de la velocidad de sedimentación.

El método utilizado es compatible con el método 2540F para sólidos sedimentables del *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"*.



Figura 21. Conos Imhoff utilizados para la medición de sólidos sedimentables y velocidad de sedimentación.

### **3.4.6 Nitrógeno Amónico**

Los valores de Nitrógeno Amónico se obtuvieron utilizando un colorímetro de la marca HACH de modelo DR900 (Figura 17), para esto se utilizó 3 gotas de estabilizador mineral, 3 gotas de alcohol de polivinilo y 1 mL de reactivo Nessler, en ese orden y mezclando después de añadir cada uno. Debido a que el agua tenía altas concentraciones de nutrientes, las muestras fueron diluidas y luego se obtuvo el valor real multiplicando por el factor de dilución correspondiente. Se utiliza el método de análisis HACH Method 8038 que es compatible con el método 4500-NH<sub>3</sub> del *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"* que es utilizado por el A y A.



Figura 22. Reactivos para la realización del ensayo de nitrógeno amoniacal

### 3.4.7 Nitrato

Para la obtención de la concentración de nitrato en las muestras analizadas se utilizó el reactivo Nitraver5, comercializado por la marca HACH. Posteriormente se procedió a leer la muestra con el reactivo en el colorímetro modelo DR 900 de la misma marca, utilizando el método de análisis HACH Method 8171.



Figura 23. Reactivos para la realización del ensayo de nitrato

### 3.4.8 Nitrito

Para la obtención de la concentración de nitrato en las muestras analizadas se utilizó el reactivo Nitriver3, comercializado por la marca HACH. Posteriormente se procedió a leer la muestra con el reactivo en el colorímetro modelo DR 900 de la misma marca, utilizando el método de análisis HACH method 8507.

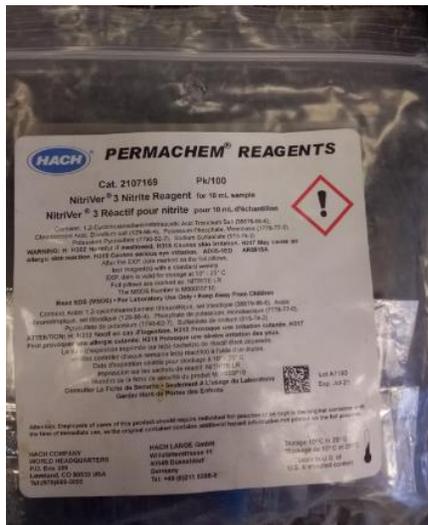


Figura 24. Reactivos para la realización del ensayo de nitrito

### 3.4.9 Fósforo

De manera muy similar a la medición llevada a cabo para encontrar la concentración de nitrato y nitrógeno amoniacal en el agua residual analizada, se utilizó para la concentración de fósforo el colorímetro de la marca HACH modelo DR900 con el método de análisis HACH Method 8048 el cual es compatible con el método 4500P D del *"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater"*, que es el usado por A y A.

Para la obtención de este parámetro químico fue necesaria la implementación del reactivo Phosver 3, fabricado y distribuido por la HACH.

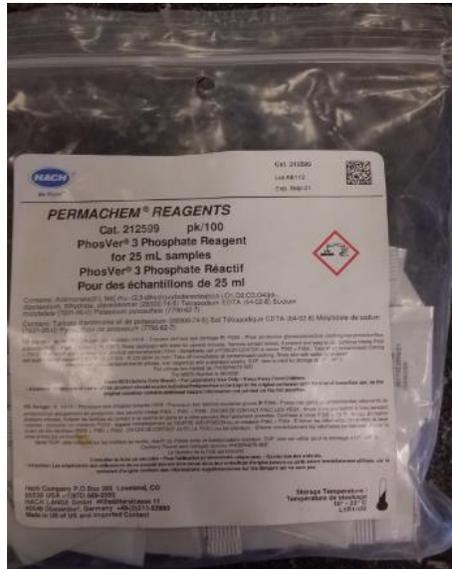


Figura 25. Reactivos para la realización del ensayo de fósforo

## **CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA URBANIZACIÓN SANTA CECILIA**

### **4.1. GENERALIDADES**

#### **4.1.1 Ubicación**

Puriscal limita al norte con los cantones de Mora y Turrubares, al sur con Parrita, al este con Turrubares y al oeste con Mora y Acosta.

La urbanización de Santa Cecilia se localiza en la provincia de San José, en el cantón No.4 de Puriscal en el distrito N.º1 de Santiago. La planta pertenece a la cuenca 88-26 y utiliza como cuerpo receptor el río Chuba en el punto de descarga localizado en las coordenadas Lambert 502,3 / 203,3.

La planta limita en todas direcciones con casas de habitación pertenecientes a la urbanización de Santa Cecilia, posee dos salidas, una por calle de lastre que, según el plano, pertenece al área de la planta de tratamiento y otra que es parte de la carretera pública.

En la Figura 26 se muestra la localización de la planta de tratamiento en la urbanización de Santa Cecilia, en la Figura 27 se aprecia la ubicación de la urbanización dentro del distrito de Santiago.



Figura 26. Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Google maps, 2019

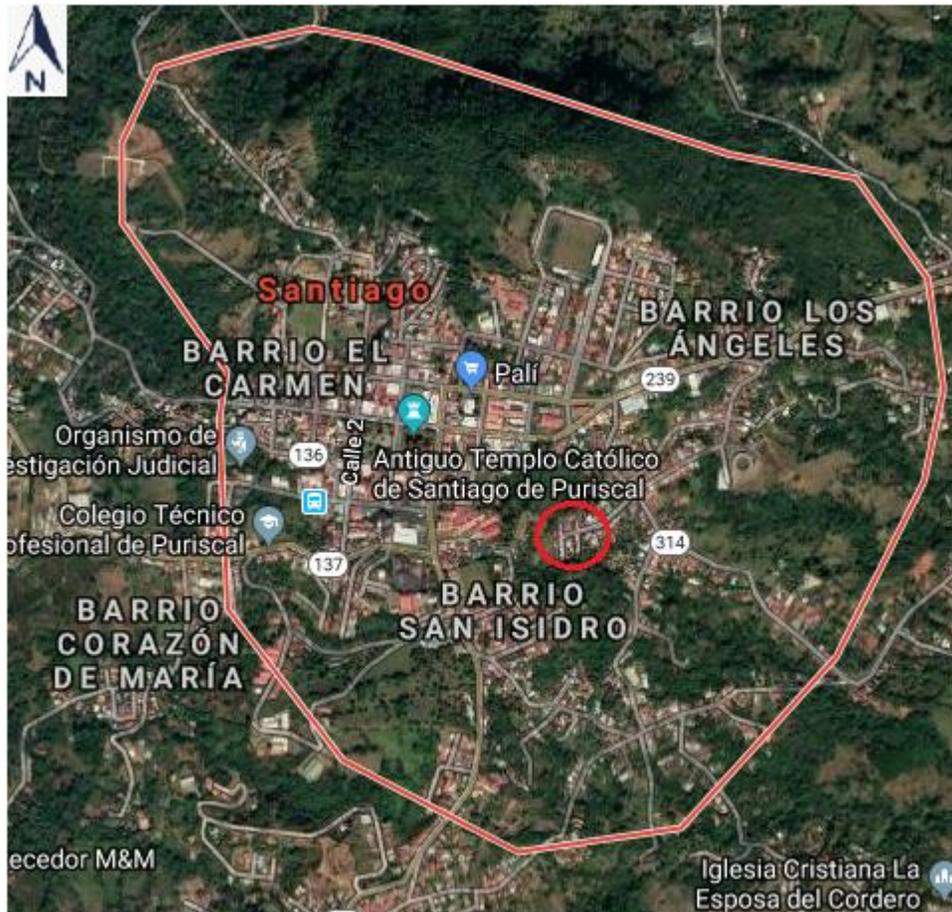


Figura 27. Ubicación de la zona de estudio en el distrito de Santiago.

Fuente: Google maps, 2019

#### **4.1.2 Reseña histórica**

En la época precolombina, el territorio que actualmente ocupa el cantón de Puriscal pertenecía al Cacique Pacacua.

En la época colonial (año de 1601) fungió como zona de paso, descanso e intercambio comercial con Panamá.

En el año 1815 la zona se comienza a colonizar principalmente con familias provenientes de Desamparados, Alajuelita, Tibás y otras familias de origen francés.

En el año de 1858 se construyó la primera ermita en el episcopado de Monseñor Anselmo Llorente y Lafuente. En el año de 1871 se fundó la parroquia de Santiago Apostol.

En agosto de 1868, Puriscal se instituyó como cantón de la provincia de San José.

En 1900 se construyó la actual escuela Darío Flores Hernández, en 1953 se estableció dentro de las instalaciones la Escuela Complementaria y en el año de 1958 se le cambió el nombre a Liceo de Puriscal.

En la administración de don Ricardo Jiménez Oreamuno se le otorgó a Puriscal la categoría de ciudad en el año de 1926, luego de haber sido categorizada como villa desde el año 1815.

La primera cañería se construyó en los años de 1920 a 1923 y el alumbrado público se inauguró en julio de 1926.

A inicios del siglo XIX se constituyó como el granero del país, debido a que producía la mayor parte de los productos que se consumían en el Valle Central. (Instituto de Desarrollo Rural, 2014)

#### **4.1.3 Aspectos socioeconómicos**

Puriscal cuenta con una superficie aproximada de 556,05 km<sup>2</sup> y registra alturas desde los 2 hasta los 2338 msnm, dentro del cual, según datos del INEC (2011) alberga a cerca de 33 004 habitantes.

El distrito de Santiago, en el que se localiza la planta de tratamiento, posee una extensión de 34,6 km<sup>2</sup>

El cantón de Puriscal cuenta con bastante riqueza natural y cultural, desde obras denominadas de patrimonio histórico nacional, hasta un Parque Nacional (La Cangreja) y un Corredor Biológico (Paso de Las Lapas). La zona también es de importancia agrícola, donde su clima permite la producción de diversos cultivos, además de actividades ganaderas, de comercio y servicios en general. (Instituto de Desarrollo Rural, 2014)

#### **4.1.4 Condiciones climáticas**

El cantón de Puriscal se localiza en la región climática del Pacífico Central, la diferencia de altitudes crea en el territorio una multiplicidad de climas que van desde el denominado Bosque Húmedo Premontano hasta el Bosque Pluvial Premontano.

En cuanto a los regímenes de lluvias, los niveles de precipitación abarcan desde 2000 mm/año (en sus zonas moderadamente secas), hasta los 3479 mm/año, se registran temperaturas promedio de 15 °C a 26 °C. (Instituto de Desarrollo Rural, 2014)

#### 4.1.5 Topografía

La zona se considera montañosa, según se puede observar en la Figura 28 del mapa de rangos de elevación del ITCR 2008 (Atlas de Costa Rica), Santiago se localiza entre alturas de 528 a 2338 msnm.

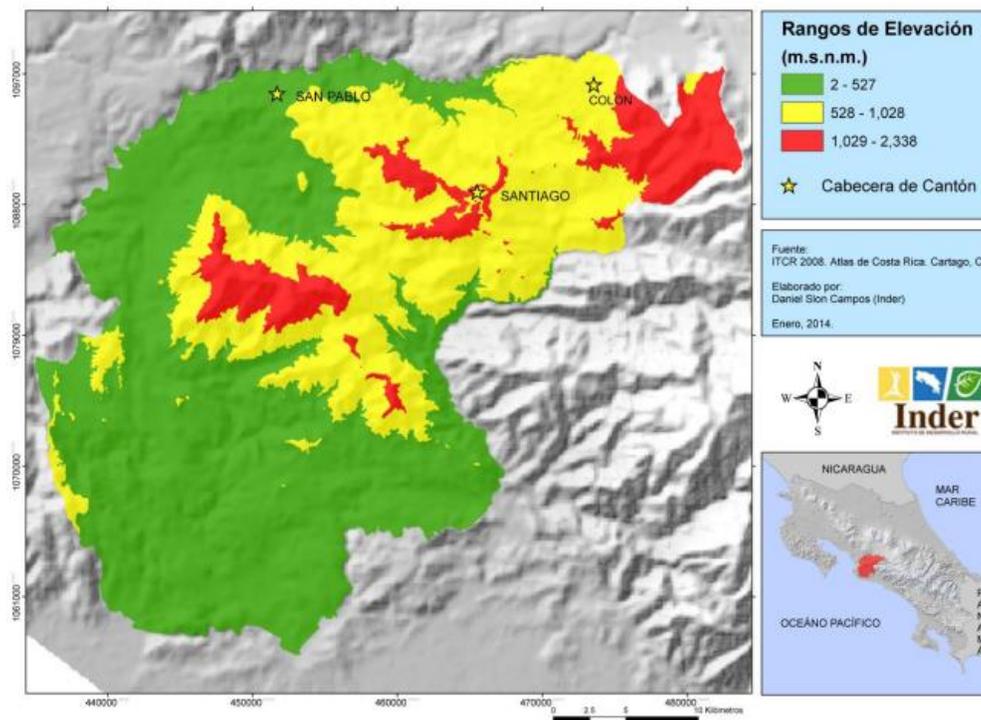


Figura 28. Mapa de rangos de elevación en msnm de la zona de estudio

Fuente: Instituto de Desarrollo Rural, 2014

El territorio alrededor de la planta de tratamiento muestra pendientes escarpadas que oscilan entre los 0 y 64 grados como se puede observar en la Figura 29, dentro de la planta se aprovechan estas condiciones para favorecer el flujo del agua residual a través de los elementos y evitar inversiones en sistemas de bombeo.

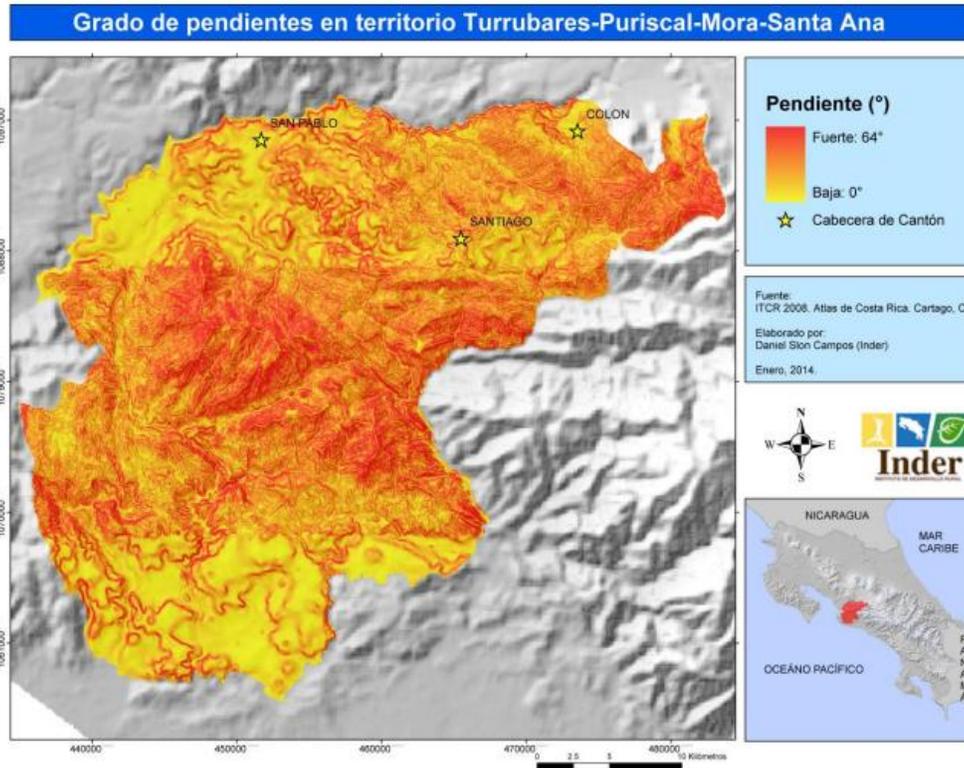


Figura 29. Mapa de rangos de pendiente en grados de la zona de estudio

Fuente: Instituto de Desarrollo Rural, 2014

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

La planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Cecilia en Puriscal posee un tren de tratamiento con los componentes que se presentan en la Figura 30. La elección de los sistemas depende de una serie de factores a considerar, como lo es el caudal de entrada y sus variaciones, las características del agua a tratar, las limitaciones climáticas, los residuos provenientes del tratamiento, las limitaciones ambientales, químicas, energética, costos de mantenimiento, necesidades personales, disponibilidad de espacio, entre otros factores.

Las características del agua residual se consideran de origen doméstico; pero en algunos casos las concentraciones son mayores a las esperadas como en la DBO.

Las variaciones de caudal no son grandes debido a que la población servida es pequeña, por esta razón tampoco se recomienda el uso de sistemas que requieran de energía eléctrica constante para su funcionamiento.

El tren de tratamiento consiste en sistemas de tratamiento primario y secundario. Para los primeros se cuenta con caja de rejillas, trampa de grasas y sólidos y sedimentador que funcionan removiendo sólidos por medios físicos, mientras que el reactor UASB trabaja como separador físico y a la vez como tratamiento secundario utilizando bacterias anaerobias para la remoción de DBO y DQO. Finalmente, el filtro percolador utiliza aireación natural para promover el desarrollo de bacterias aerobias y por ende el tratamiento biológico.

El área que abarca la planta es de 1515,66 m<sup>2</sup> y era originalmente un potrero. La cantidad de conexiones existentes es de aproximadamente 40, la distancia a la vivienda más cercana es de 30 m, sin estaciones de bombeo. La planta se construyó en el año de 1992, con un sistema de reactor UASB diseñado por el Ing. Victor Cordero.

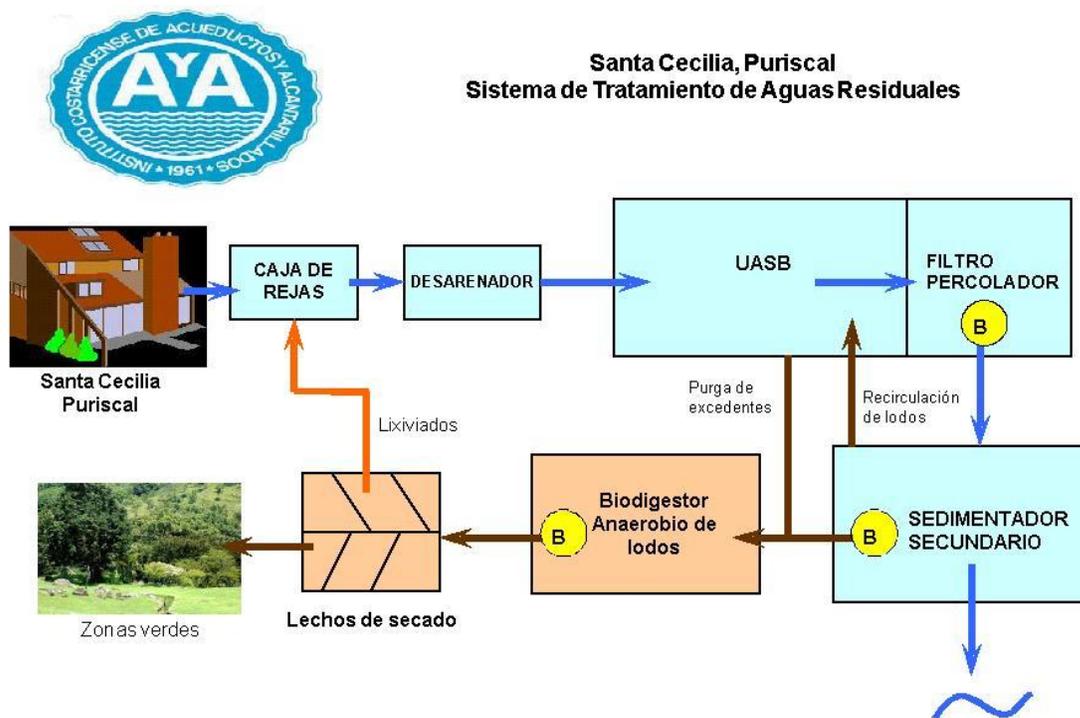


Figura 30. Distribución de la planta de tratamiento

Fuente: Badilla, 2012

El personal encargado de la planta de planta de tratamiento describe la cronología de la misma desde su construcción en 1992 hasta la actualidad. Entre los años 2008 y 2009 el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) asumió la administración del sistema. Previo a eso estuvo a cargo de la Municipalidad, que tuvo la responsabilidad de realizar la rehabilitación del sistema debido al recurso de amparo presentado en el año 2005 por los habitantes de la zona.

Desde el 2009 hasta el 2012 se realizaron sustituciones de los elementos deteriorados, y se construyó la bodega, además se tomaron medidas de operación y mantenimiento para el cumplimiento del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

En el año 2012 se realiza la limpieza interna y rehabilitación del reactor UASB (Figura 31), la construcción de la caseta de operación, la acometida eléctrica, cordón y caño y el mantenimiento de las cajas de registro.



Figura 31. Reactor UASB y sistema de recolección de gases previo a las mejoras.

Fuente: Acueductos y Alcantarillados, 2005

En el año 2015 se sustituyeron las rejillas y el vertedero triangular, se instaló la antorcha y se realizó el sellado del reactor UASB como se puede observar en la Figura 32.



Figura 32. Caja de rejillas y vertederos, previo a las modificaciones realizadas

Fuente: Acueductos y Alcantarillados, 2005

#### **4.2.1 Caja de Rejas**

Su función es retener sólidos gruesos que llegan al sistema y entorpecen su funcionamiento normal, el material retenido podrá ser transportado hacia un lugar adecuado para su disposición. Se coloca un recipiente dentro del contenedor de las rejillas en el cual se recogen los sólidos que quedan retenidos en las mallas, según lo observado, existen 2 mallas, con una separación entre barras diferentes; originalmente se tiene un tubo de entrada de PVC de 200 mm (8 pulgadas), pero se puede observar que se hizo una reducción del diámetro con un tubo cortado colocado en el interior del primero. Posee, además, un recipiente para almacenar los sólidos que se recogen durante el mantenimiento para ser desechados cuando esté lleno. No se observa colmatación del sistema.



Figura 33. Caja de rejas de la planta de tratamiento de Santa Cecilia

#### **4.2.2 Desarenador**

Se encarga de retener sólidos sedimentables que se encuentran en las aguas residuales, se diseña para remover materia no putrescible que pueda dañar equipos mecánicos y restar capacidad a las unidades de tratamiento, cuenta con un vertedor triangular y un agujero de rebalse a la capacidad de caudal máximo, el contenedor del sistema es de concreto impermeabilizado, que se ha visto deteriorado por la acidez que presenta el agua.

Se puede observar que sólidos de un tamaño apreciable ingresan al desarenador, por lo que se coloca en la primera fase un muro para retener sólidos sedimentables y se coloca el tubo que comunica a la siguiente fase del desarenador en la parte inferior para evitar el paso de los sólidos flotantes.

Posteriormente pasa una zona de mayor longitud, que permite la sedimentación de más sólidos con un tiempo de retención hidráulica mayor y cuenta con un vertedero triangular de 2 contracciones que regula el caudal de agua, junto con el agujero de rebalse.



Figura 34. Entrada al desarenador de la planta de tratamiento de Santa Cecilia



Figura 35. Vertedero triangular del sedimentador primario

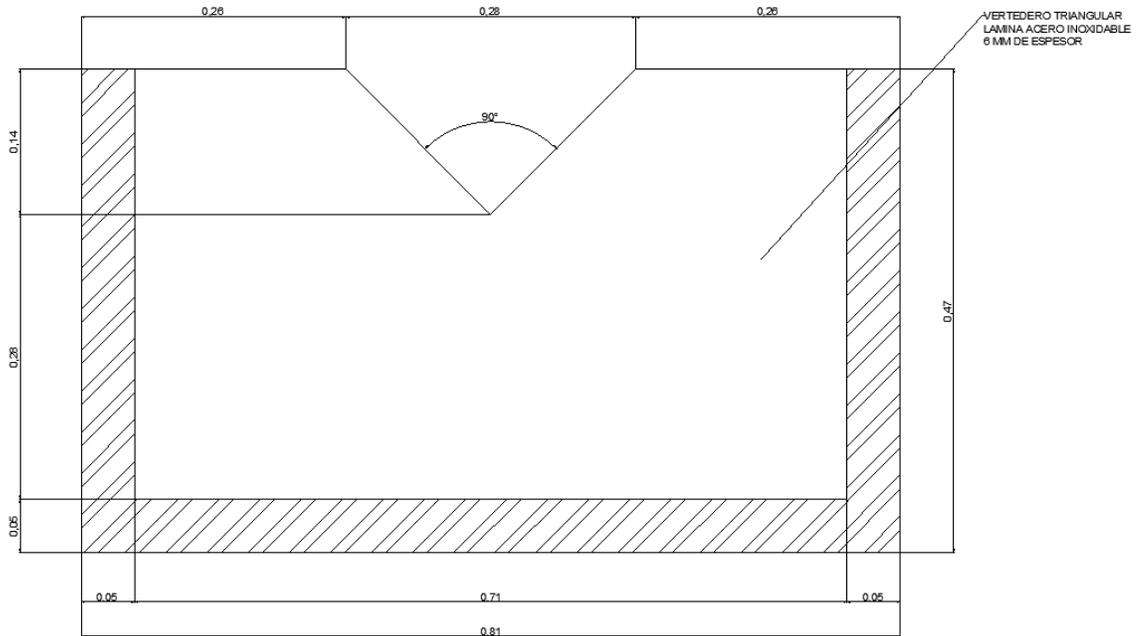


Figura 36. Dimensionamiento del vertedero triangular.

Modificado de: Acueductos y Alcantarillados, 1992

### 4.2.3 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

Permite el tratamiento anaerobio de las aguas residuales, haciendo una separación por densidad de las partículas de forma zonificada, en la parte inferior del sistema se deposita el lodo, el cual, es digerido preliminarmente de manera anaeróbica; sobre el lodo se desarrolla una capa de crecimiento bacteriano más disperso con un manto de lodo que tiene una velocidad de sedimentación de los sólidos más baja. Posee una cámara de sedimentación donde es separada la fase líquida del lodo más pesado y el resto retorna a la cámara de digestión, además de una campana que recolecta el gas metano liberado del proceso, ese es dirigido a una chimenea que se encarga de quemar el gas y convertirlo en dióxido de carbono. En la parte superior se cuenta con unas canoas que reciben el agua con una cantidad menor de lodo y la transportan por medio de una tubería al filtro percolador.

Cuenta con seis válvulas de inspección y una válvula de purga; de las válvulas, sólo 2 funcionan de manera adecuada, ya que el resto están obstruidas.

El sistema inicialmente contaba con canoas metálicas que fueron sustituidas por canoas de fibra de vidrio para prolongar la vida útil de las mismas, como las que se observan en la Figura

39; se les hizo una unión al sistema para sellar las filtraciones, pero actualmente el agua se filtra por la parte inferior de las canoas saliendo directamente al filtro por la tubería.

Se puede observar en la Figura 37, además, que existen 6 tuberías de entrada al sistema que según el personal encargado de la PTAR tienen una distribución equitativa del área de influencia para la entrada al reactor UASB y de estas una se encuentra colmatada.



Figura 37. Distribución de entrada al reactor UASB, antes y después de la colocación de los vertederos.



Figura 38. Reducción del tubo de entrada al reactor UASB



Figura 39. Canaleta de fibra de vidrio y orificio de salida del agua del reactor UASB



Figura 40. Vertederos triangulares de la canaleta y sellado de las filtraciones



Figura 41. Válvulas de inspección de lodos del reactor UASB



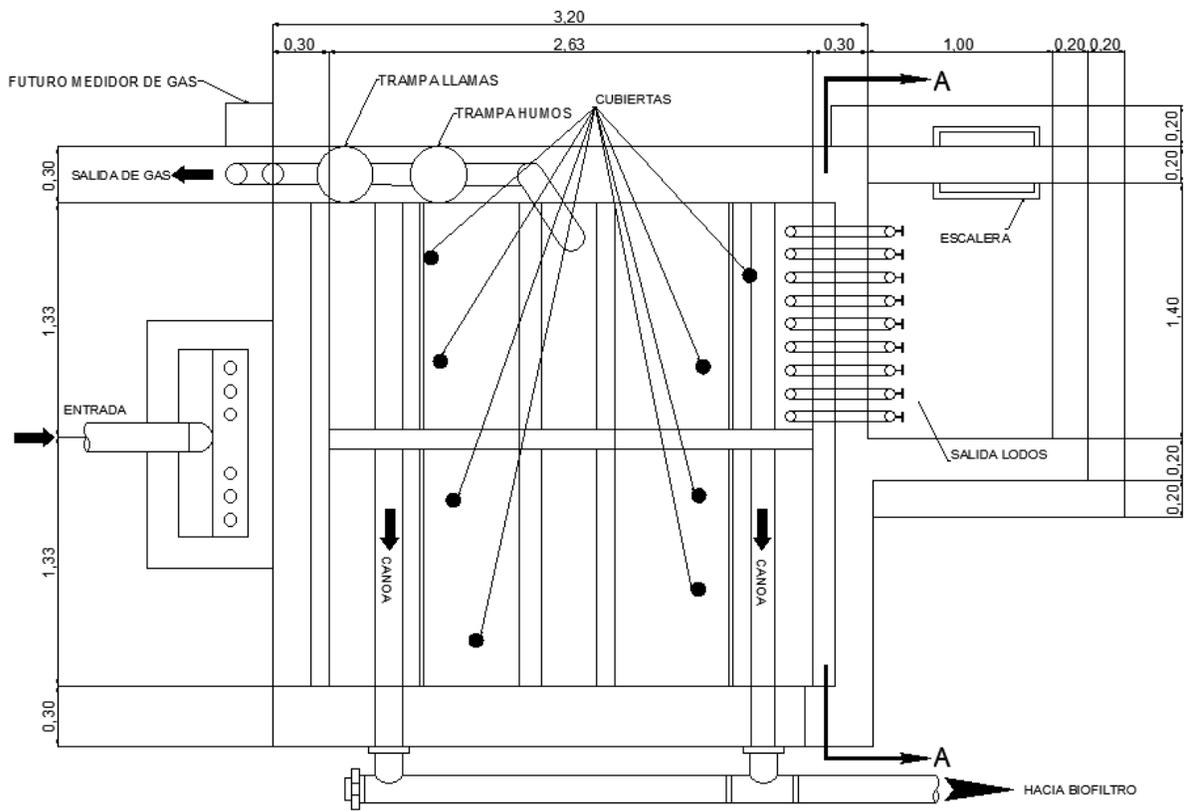


Figura 43. Vista en planta de los componentes del reactor UASB.

Modificado de: Acueductos y Alcantarillados, 1992

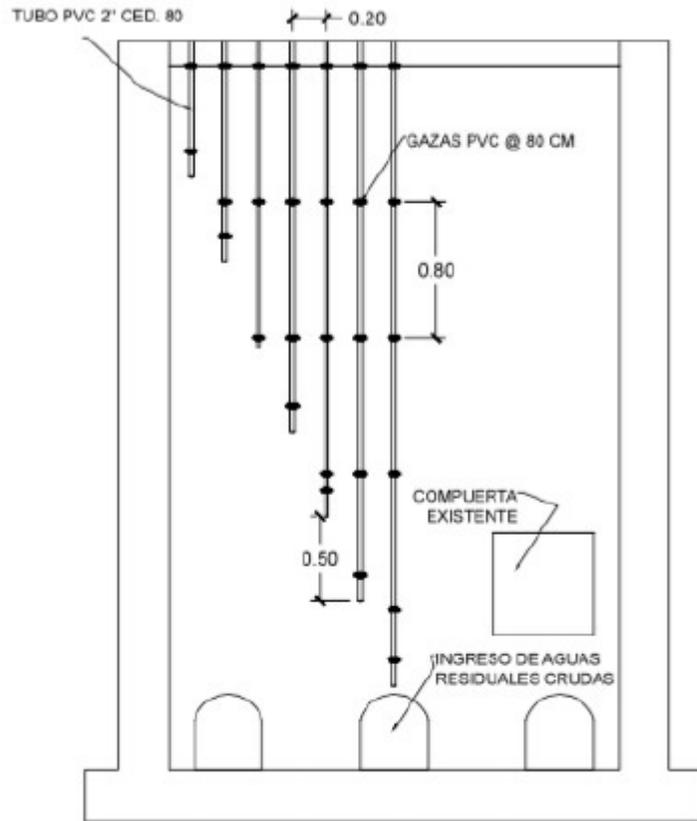


Figura 44. Corte A-A Distribución lateral de las válvulas de inspección del reactor UASB.

Fuente: Acueductos y Alcantarillados, 2019

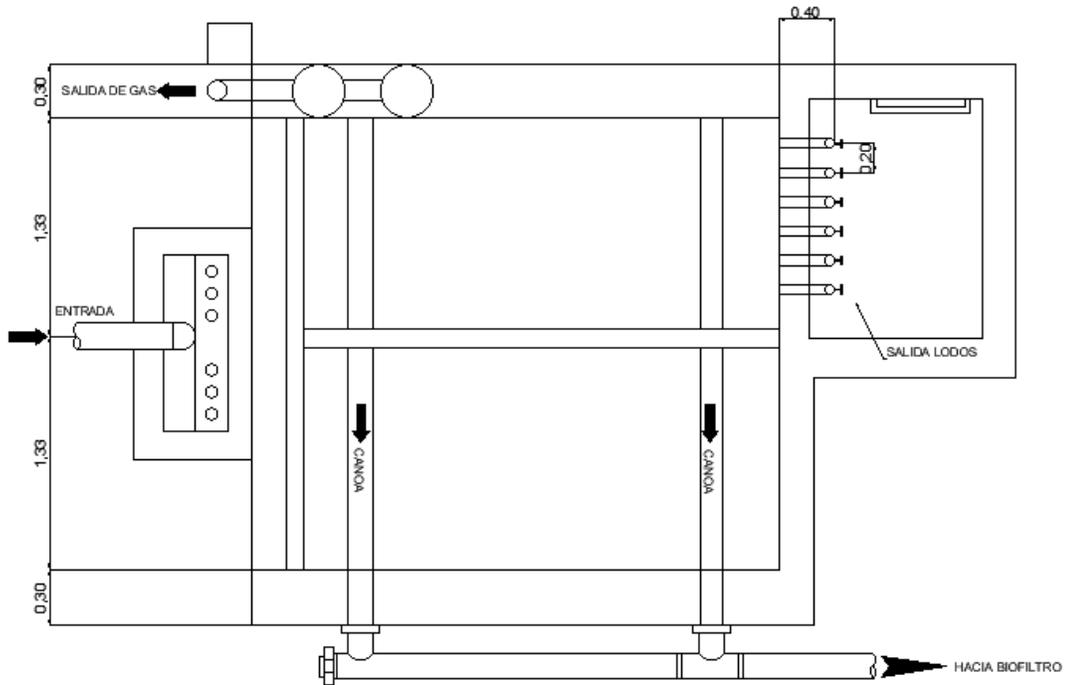


Figura 45. Distribución en planta de las válvulas de inspección del reactor UASB.

Fuente: Acueductos y Alcantarillados, 2019

En la Figura 46 se aprecia el sistema de evacuación del gas producido en el reactor UASB, que cuenta con una trampa de humos y una trampa de llamas. El gas es recolectado por una campana en el interior del sistema, el cual es recolectado en la trampa de humos y se incinera en la trampa de llamas convirtiendo el gas metano en dióxido de carbono.



Figura 46. Trampas de humos y de llamas del reactor UASB

Fuente: Acueductos y Alcantarillados, 2019

#### 4.2.4 Filtro Percolador

Es una unidad de contacto, donde el agua residual pasa a través de un filtro de grava que desarrolla una biopelícula que promueve el tratamiento microbiológico, es un sistema aeróbico que cuenta con 4 capas de material de soporte, con aireación natural por medio de agujeros rectangulares alrededor de la estructura donde se ubican las capas, el agua cae por goteo a lo largo de las tuberías que cuentan con pequeños orificios, y se mantiene girando para una distribución más equitativa; debido al bajo caudal que maneja, el agua no cubre todos los orificios de salida.

La granulometría del material de soporte del filtro no es gradualmente variada, solo se cuenta con un tamaño de grava en toda la profundidad, además se realizó un cambio en la capa superior cambiando el material de soporte por esponjas tipo DHS con una altura de 0,6 m; se inició su colocación el día viernes 22 de marzo del año 2019 utilizando una combinación de las esponjas traídas de Japón por AyA y otras de uso comercial obtenidas en Costa Rica.



Figura 47. Zona superior del filtro previo al cambio del material de soporte por esponjas.



Figura 48. Zona superior del filtro después del cambio del material de soporte por esponjas.

#### **4.2.5 Sedimentador Secundario**

Permite la decantación de los lodos producidos como resultado de la actividad biológica que se desarrolla en el biofiltro, al final de este se coloca una placa con vertedores para retener los sólidos que se precipitan, actualmente no se realiza recirculación de estos lodos; por lo cual es recomendable purgar sus excedentes hacia el digester de lodos.

Como se observa en la Figura 50 los sólidos no se están purgando como es recomendado, por lo tanto, los sólidos que se precipitan se oxigenan y se elevan a la superficie del agua.



Figura 49. Entrada al sedimentador secundario.



Figura 50. Sedimentador secundario con presencia de sólidos flotantes.

#### **4.2.6 Digestor de Lodos**

“Los lodos recuperados del sedimentador secundario periódicamente deberán ser purgados en forma parcial hacia esta unidad con el fin de mantener un equilibrio óptimo entre el sustrato que ingresa al UASB, al filtro percolador y la masa microbiana que deberá degradarlo.” (Badilla, 2012)

Este digestor forma parte del tratamiento de aguas residuales del reactor UASB, debido a los bajos caudales que entran a la planta y, además, a que no hay recirculación del agua.

#### **4.2.7 Lechos de Secado**

“A esta unidad serán conducidos los lodos resultantes del tratamiento, previamente estabilizados anaeróbicamente en el digestor de lodos.” (Badilla, 2012)

Los lodos estabilizados son extendidos en los lechos de secado, en los cuales se va a deshidratar con ayuda de la radiación solar y ventilación; debido al bajo caudal no se produce gran cantidad de lodos; además, el reactor UASB no se purga con la frecuencia esperada y los lodos del sedimentador secundario no son retirados, por lo que estos lechos de secado pasan periodos largos en desuso.



Figura 51. Digestor de lodos y lecho de secado de lodos

Fuente: Acueductos y Alcantarillados



Figura 52. Lecho de secado de lodos de la PTAR

Fuente: Acueductos y Alcantarillados

#### **4.2.8 Caseta de Operación**

La caseta se divide en dos cubículos, en cada uno hay un servicio sanitario con lavatorio, se cuenta con una computadora, y una mesa para experimentación con el equipo necesario y cuenta con un lavabo exterior lo que cumple con lo requerido por el manual de operación y mantenimiento. (Badilla, 2012)



Figura 53. Caseta de operación de la PTAR

Fuente: Acueductos y Alcantarillados

### 4.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PLANTA

Se realiza una comparación del manual de operación y mantenimiento de la planta con el Reglamento de Aprobación y Operación de los Sistemas de Aguas Residuales N.º 31545. El manual cuenta con los requisitos mínimos establecidos en el Reglamento.

La planta opera de forma continua y los horarios laborales se dividen en dos turnos de seis horas cada uno, se cuenta con dos operadores que son los encargados en cada uno de los turnos.

En el Cuadro 11 se resumen las acciones de mantenimiento de la planta y la frecuencia de estas con respecto a cada unidad.

Cuadro 11. Acciones de mantenimiento de los sistemas de la planta y frecuencias de realización recomendadas.

| <b>Unidad</b>             | <b>Actividad</b>   | <b>Frecuencia</b> |
|---------------------------|--|-------------------|
| Rejillas                  | Extracción de sólidos retenidos y limpieza   | Diaria            |
|                           | Inspección del sistema   | Semanal           |
| Laguna de secado de lodos | Preparación  | Antes de cada uso |
| Sedimentador primario     | Purga de lodos (primarios)   | Según SSVLM       |
|                           | Limpieza de vertederos   | Diaria            |
| Sedimentador secundario   | Purga de lodos (secundarios)   | Según SSVLM       |
|                           | Limpieza de vertederos   | Diaria            |
| Estructuras metálicas     | Inspección   | Mensual           |
|                           | Pintura anticorrosiva  | Anual             |
| Control operacional       | Anotaciones en bitácora  | Diaria            |
|                           | Medición de pH, sólidos sedimentables, oxígeno disuelto, temperatura   | Diaria            |
| Regencia ambiental        | Inspecciones sanitarias  | Semanal           |
|                           | Análisis de DBO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, pH, temperatura, grasas y aceites (laboratorio acreditado). | Trimestral        |
|                           | Reporte operacional Ministerio de Salud  | Trimestral        |

Modificado de: Badilla, 2012

En el Cuadro 12 se presenta la frecuencia de mantenimiento que se le da a los sistemas de la planta, se pudo observar que la laguna de secado de lodos no se utiliza, ni se limpia, ya que tampoco se realizan purgas del reactor UASB.

El personal encargado de la planta confirmó que el Laboratorio Nacional de Aguas no realiza pruebas de SSV, por lo que no se puede usar este parámetro para comprobar con qué frecuencia requiere el sistema que se realice la extracción de los lodos.

Debido a que las válvulas de muestreo de lodos no se purgan con la frecuencia adecuada, solamente funcionan dos, de las seis que posee, esto debido a que las otras presentan bloqueos en su flujo, probablemente producto de la densificación de los lodos en los puntos de salida.

Con respecto a los parámetros de regencia ambiental, el Laboratorio Nacional de Aguas realiza muestreos de forma semestral en la planta; y genera un reporte operacional cumpliendo con las acreditaciones de las pruebas realizadas.

Las revisiones que realiza el Ministerio de Salud son esporádicas y sin aviso; pero estas visitas a plantas de tratamiento se realizan muy poco.

Cuadro 12. Actividades de mantenimiento de los sistemas de la planta, frecuencias de realización y cumplimiento según el reglamento y manual de operación.

| <b>Unidad</b>             | <b>Actividad</b>   | <b>Frecuencia</b> | <b>Cumple</b> |
|---------------------------|--|-------------------|---------------|
| Rejillas                  | Extracción de sólidos retenidos y limpieza   | Diaria            | OK            |
|                           | Inspección del sistema   | Diaria            | OK            |
| Laguna de secado de lodos | Preparación  | -                 | NO            |
| Sedimentador primario     | Purga de lodos (primarios)   | -                 | NO            |
|                           | Limpieza de vertederos   | Diaria            | OK            |
| Sedimentador secundario   | Purga de lodos (secundarios)   | -                 | NO            |
|                           | Limpieza de vertederos   | Diaria            | OK            |
| Estructuras metálicas     | Inspección   | Semanal           | OK            |
|                           | Pintura anticorrosiva  | -                 | NO            |
| Control operacional       | Anotaciones en bitácora  | Diaria            | OK            |
|                           | Medición de pH, sólidos sedimentables, oxígeno disuelto, temperatura   | Diaria            | OK            |
| Regencia ambiental        | Inspecciones sanitarias  | Semestral         | NO            |
|                           | Análisis de DBO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, pH, temperatura, grasas y aceites (laboratorio acreditado). | Semestral         | NO            |
|                           | Reporte operacional Ministerio de Salud  | -                 | NO            |

#### 4.4. REVISIÓN DE DISEÑO DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Los componentes en los cuales se va a enfocar la revisión del diseño van a ser los del filtro percolador y reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). Para esto se van a analizar ciertos factores como lo son: Parámetros de calidad del agua, parámetros de diseño y parámetros de evaluación del proceso.

Inicialmente en la Cuadro 13 se muestran rangos de eficiencia de remoción para los diferentes procesos de tratamiento.

Cuadro 13. Eficiencias de remoción para la selección de los procesos de tratamiento

| Unidades de tratamiento                            | Remoción (%) |         |         |          |         |                    |
|--|--------------|---------|---------|----------|---------|--------------------|
|  | DBO          | DQO     | SST     | Ptotal   | Norg    | NH <sub>3</sub> -N |
| Rejas de barras                                    | 0            | 0       | 0       | 0        | 0       | 0                  |
| Desarenadores                                      | 0 - 5        | 0 - 5   | 0 - 10  | 0        | 0       | 0                  |
| Sedimentación primaria                             | 30 - 40      | 30 - 40 | 50 - 65 | 10 - 20  | 10 - 20 | 0                  |
| Filtros rociadores alta carga, medio natural       | 65 - 80      | 60 - 80 | 60 - 85 | 8,0 - 12 | 15 - 50 | 8,0 - 15           |
| Filtros rociadores carga muy alta, medio sintético | 80 - 85      | 80 - 85 | 80 - 85 | 10 - 25  | 15 - 50 | 8,0 - 15           |
| RAFA   | -            | 90 - 95 | -       | -        | -       | -                  |
| FAFA   | 92           | 89      | -       | -        | -       | -                  |
| Filtración   | 20 - 50      | 20 - 50 | 60 - 80 | 20 - 50  | 50 - 70 | 0                  |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

También se presentan en el Cuadro 14 los efectos de los principales contaminantes en las aguas residuales; de estos se van a evaluar por medio de experimentación los sólidos, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), el nitrógeno, fósforo, el potencial de hidrógeno (pH) y conductividad.

Cuadro 14. Efectos de los principales contaminantes en las aguas residuales domésticas

| <b>Constituyente</b>                | <b>Contaminantes</b>  | <b>Importancia</b>  |
|-------------------------------------|---|---|
| Sólidos suspendidos                 | Incluye partículas suspendidas de tipo orgánico (volátiles) e inorgánico (fijos)            | Las partículas suspendidas absorben contaminantes orgánicos y metales pesados; protegen a los microorganismos de los agentes desinfectantes y en cantidades excesivas tapan los sistemas de irrigación  |
| Materia orgánica biodegradable      | Demanda bioquímica de oxígeno<br>Demanda química de oxígeno Carbón orgánico total (COT)     | Si se descarga al ambiente su estabilización biológica consume oxígeno y desarrolla condiciones sépticas que significan problemas estéticos y de salud ambiental. La materia orgánica provee alimento a los microorganismos e interfiere con los procesos de desinfección   |
| Nutrientes                          | Nitrógeno/ Fósforo  | Nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas; su presencia mejora la calidad del agua de riego. Cuando son descargados a un cuerpo de agua, el N y el P pueden influir en el crecimiento de malezas acuáticas. Al aplicar niveles excesivos de N en los cultivos, puede incrementarse la concentración de nitratos en aguas subterráneas. |
| Compuestos orgánicos estables       | Compuestos específicos (Pesticidas, hidrocarburos halogenados...)                           | Algunos de estos compuestos resisten los métodos convencionales de tratamiento y son tóxicos en el ambiente, lo que puede limitar los usos del agua, sobretodo para el consumo humano.  |
| Concentración de iones de hidrógeno | Potencial de hidrógeno (pH)   | Afecta la desinfección, la coagulación, la solubilidad de los metales y la alcalinidad. En las aguas domésticas el pH va de 6,5 a 8,5.  |
| Compuestos inorgánicos disueltos    | Sólidos disueltos totales Conductividad eléctrica Elementos específicos (Na, Ca, Mg, Cl, B) | En cantidades excesivas pueden dañar cultivos y suelos; iones específicos como los cloruros, sodio y boro son tóxicos para algunos cultivos   |
| Microbiológico                      | Virus, Bacterias, Protozoarios, Helmitos  | Existen en grandes cantidades en las aguas residuales y son transmisores de enfermedades contagiosas para el hombre que en la actualidad presentan un grave problema de salud   |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

#### 4.4.1 Parámetros de diseño de filtros percoladores (rociadores)

En el Cuadro 15 se presentan los rangos de valores de las características utilizadas para identificar el tipo de filtro percolador.

Cuadro 15. Características de un filtro rociador según las cargas o tipo de filtro.

| Característica  | Carga            |                          |                    |                    | Filtros de desbaste  | Filtros de dos etapas |
|---|------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
|   | Baja             | Intermedia               | Alta               | Súper alta         |                      |                       |
| Medio filtrante   | Roca, Escoria    | Roca, Escoria            | Roca, Escoria      | Plástico           | Plástico             | Roca, Escoria         |
| Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> día)) | 1,0 - 4,0        | 4,0 - 10,0               | 10,0 - 40,0        | 40,0 - 200         | 160 -533             | 10,0 - 40,0           |
| Carga orgánica (Kg DBO/m <sup>3</sup> día))             | 0,08 - 0,32      | 0,24 - 0,48              | 0,32 -10,0         | 0,8 - 6,0          | 2,67 -10,67          | 0,32 - 10,0           |
| Profundidad (m)   | 1,80 - 2,40      | 1,80 - 2,40              | 0,90 - 1,80        | 3,0 - 12,0         | 4,50 -16,0           | 1,80 - 4,0            |
| Relación de recirculación                               | 0                | 0 - 1,0                  | 1,0 -2,0           | 0 - 2,0            | 1,0 - 4,0            | 0,5 -2,0              |
| Presencia de moscas                                     | Muchas           | Varias                   | Pocas              | Pocas o ninguna    | Pocas o ninguna      | Pocas o ninguna       |
| Desprendimiento de cultivo biológico                    | Intermitente     | Intermitente             | Continuo           | Continuo           | Continuo             | Continuo              |
| Eficiencia de remoción DBO (%)                          | 80 - 90          | 50 -70                   | 65 - 85            | 65 - 85            | 40 - 65              | 85 -95                |
| Efluente  | Bien Nitrificado | Parcialmente nitrificado | Poca nitrificación | Poca nitrificación | No hay nitrificación | Bien nitrificado      |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

En el Cuadro 16 se presentan las características del filtro existente para evaluar si cumple con las condiciones de diseño, según lo observado, el filtro cumple en su mayoría con las características de un filtro de carga intermedia.

Cuadro 16. Características del filtro existente en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Santa Cecilia

| Característica  | Filtro existente       |
|---|------------------------|
| Medio filtrante   | Roca, Esponjas         |
| Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> día)) | 2-18                   |
| Carga orgánica (Kg DBO/m <sup>3</sup> día))             | 2,32                   |
| Profundidad (m)   | 2,40                   |
| Relación de recirculación                               | 0                      |
| Presencia de moscas                                     | Pocas o ninguna        |
| Desprendimiento de cultivo biológico                    | **                     |
| Eficiencia de remoción DBO (%)                          | 33,8                   |
| Efluente  | Presenta nitrificación |

\*\*No se realizó medición de este parámetro

En el Cuadro 17 se presentan características de tamaño y profundidad eficientes para comparar con el medio filtrante existente que es actualmente en su mayoría de roca volcánica quebrada.

Cuadro 17. Características esperadas de la roca quebrada como material de soporte.

| <b>Material</b>      | <b>Roca quebrada</b> |
|----------------------|----------------------|
| Tamaño efectivo (mm) | 75 a 125             |
| Profundidad (m)      | 1,5 a 3,0            |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

Cuadro 18. Características del material de soporte existente en la planta

| <b>Material de soporte</b> | <b>Profundidad (m)</b> | <b>Diámetro (mm)</b> | <b>%Absorción</b> |
|----------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|
| Roca volcánica             | 1,8                    | 60 - 150             | 4,1               |

Según lo revisado en sitio, la profundidad efectiva inicial de la roca quebrada, en el primer muestreo; previo a la implementación de las esponjas tipo DHS, era de 2,4 m, actualmente la profundidad que abarcan las rocas es de 1,8 m.

Al comparar los valores obtenidos de la roca utilizada en el filtro, presentados en el Cuadro 18, se puede observar que cumple con los valores esperados, siendo algunas de un tamaño superior y otras de tamaño inferior al rango establecido; pero al no tener variaciones significativas se espera un comportamiento apropiado según condiciones de diseño.

El filtro de roca que se usaba previamente contaba con un área superficial del mismo tamaño que el filtro actual, este se implementó en enero del 2019 con 4 capas de material de soporte, previamente no se separa la roca en capas, y la entrada del agua o estaba equitativamente distribuida, al colocar el sistema rotativo de entrada de agua se arregló esta situación.

Las condiciones del filtro actual no se especifican en el manual de operación y mantenimiento debido a que la última actualización se realizó en el año 2012.

#### **4.4.2 Parámetros de diseño de reactor anaerobio de flujo ascendente**

Para la revisión del diseño del reactor anaerobio de flujo ascendente se debe tener en consideración las dimensiones mínimas y óptimas, además de otros parámetros como lo son la calidad del agua, la velocidad del flujo y temperatura del agua.

En la Figura 54 se muestra la distribución de los componentes de un UASB, en este se puede apreciar la separación de las fases sólida, líquida y gaseosa.

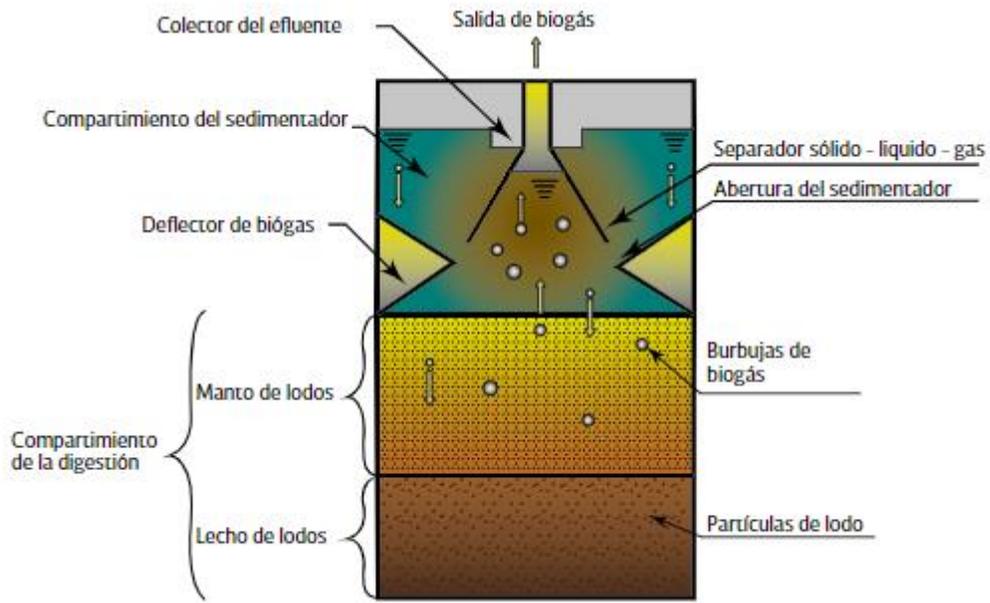


Figura 54. Distribución de las zonas de tratamiento de un reactor UASB

Fuente: Comisión Nacional de Agua, 2016

Para el correcto funcionamiento de un reactor anaerobio de flujo ascendente un parámetro importante es el tiempo de estabilización de los lodos, ya que de este depende la acción biológica de las bacterias anaerobias para asegurar que el lodo purgado tenga las condiciones adecuadas para ser desechado o reutilizado. En la Figura 55 se muestran los tiempos de retención requeridos para las diferentes temperaturas del UASB, la temperatura promedio medida en campo es de aproximadamente 24 °C por lo que se espera un tiempo de retención de aproximadamente 70 días.

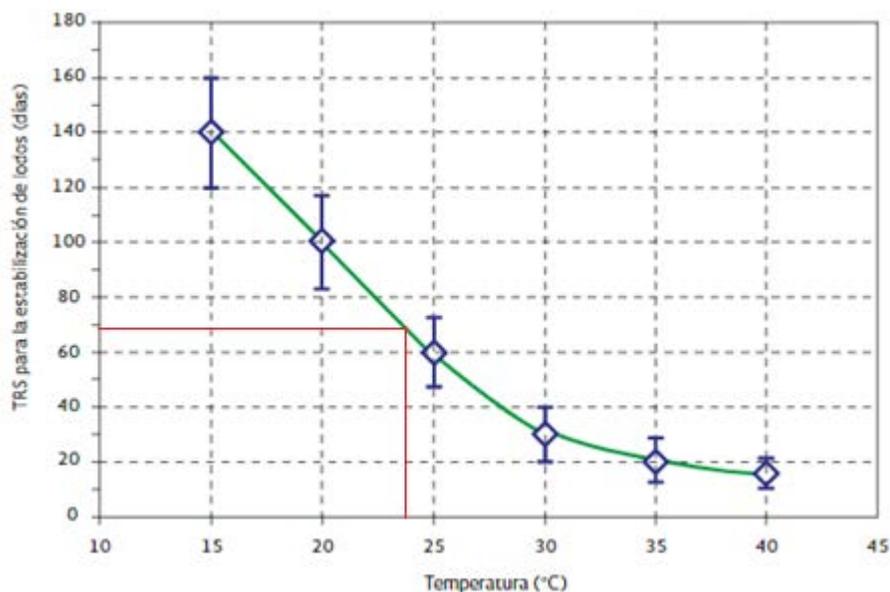


Figura 55. Tiempo de estabilización de lodos requerido para el tratamiento de aguas residuales domésticas  
 Modificado de: Comisión Nacional de Agua, 2016

Un tiempo de retención hidráulica adecuado es necesario para el correcto funcionamiento del reactor UASB, que está relacionado con el tiempo de acción de las bacterias anaerobias del sistema, en el Cuadro 19, para una temperatura de 24 °C se esperan TRH de más de 7 h para el caudal promedio y mayor a 4,5 h para el caudal máximo.

Para los valores de TRH obtenidos para el reactor en el Cuadro 7 se observa que este parámetro se cumple con valores mayores a los esperados.

Cuadro 19. Tiempos de retención hidráulica para la protección de los reactores UASB

| Temperatura del agua de alcantarillado (°C) | Tiempo de retención hidráulica |                   |
|---|--------------------------------|-------------------|
|   | Para Q medio (h)               | Para Q máximo (h) |
| 15 a 18                                     | >=10                           | >=7               |
| 18 a 22                                     | >=8                            | >=5.5             |
| 22 a 25                                     | >=7                            | >=4.5             |
| > 25  | >=6                            | >=4               |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

Otro aspecto que es relevante para el correcto funcionamiento del UASB es la velocidad de flujo ascendente o velocidad superficial, ya que de esta depende el nivel de sedimentación en

la parte baja del reactor y evita la resuspensión de las partículas, estos valores se pueden observar en el Cuadro 20.

Si se comparan los datos de diseño esperados con los obtenidos en la planta, resumidos en el Cuadro 10, se tienen valores que cumplen con la velocidad de flujo ascendente, ya que son inferiores a las velocidades recomendadas para el diseño.

Cuadro 20. Velocidades de flujo superficial recomendadas para el diseño de reactores UASB destinados a tratamiento de aguas residuales domésticas

| <b>Caudal afluente</b> | <b>Velocidad superficial (m/h)</b> |
|------------------------|------------------------------------|
| Caudal medio           | 0,5 a 0,7                          |
| Caudal Máximo          | $\leq 1,1$                         |
| Picos Temporales       | $<1.5$                             |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

Cuadro 21. Para determinar el área de influencia de los distribuidores de flujo en el reactor

| <b>Tipo de lodo</b>   | <b>Carga orgánica aplicada (kg de DQO/m<sup>3</sup>día)</b> | <b>Área de influencia de cada distribuidor (m<sup>2</sup>)</b> |
|---|---|--|
| Lodo denso y floculento<br>(concentración > 40 kg SST/m <sup>3</sup> )  | < 1,0   | 0,5 - 1,0  |
|   | 1,0 - 2,0   | 1,0 - 2,0  |
|   | > 2,0   | 2,0 - 3,0  |
| Lodo medio floculento<br>(concentración 20 a 40 kg SST/m <sup>3</sup> ) | < 1,0 - 2,0   | 1,0 - 2,0  |
|   | > 3,0   | 2,0 - 5,0  |
| Lodo granular   | 1,0 - 2,0   | 0,5 - 1,0  |
|   | 2,0 - 4,0   | 0,5 - 2,0  |
|   | > 4,0   | > 2,0  |

Fuente: Comisión Nacional de Agua

En el Cuadro 21 se presentan los valores de área de influencia de los distribuidores en la parte inferior del reactor UASB separados con respecto al tipo de lodo y a la carga orgánica presente en el reactor.

Cuadro 22. Características del reactor UASB existente para el tratamiento de lodos

| <b>Sistema</b> | <b>COV (kg DQO/m<sup>3</sup>*d)</b> | <b>Área de influencia de cada distribuidor (m<sup>2</sup>)</b> |
|----------------|-------------------------------------|--|
| UASB           | 0,817                               | 1,167  |

En el en el reactor.

**Cuadro 22** se estima el área de influencia considerada para cada distribuidor considerando los seis distribuidores según los tubos de entrada; la distribución no se observa en los planos entregados por A y A, pero fue corroborada su distribución equitativa por el personal que estuvo presente en el montaje del sistema.

Con respecto al lodo denso y floculento, el área de influencia cubre con las dimensiones esperadas para la carga orgánica medida, siendo las áreas de un tamaño superior al rango esperado, lo que indica que el sistema puede soportar mayores cargas orgánicas, al igual que en el caso del lodo granular y el lodo medio floculento.

Cuadro 23. Principales criterios hidráulicos para el diseño de un reactor UASB de aguas residuales domésticas.

| <b>Criterio/Parámetro</b>                               | <b>Intervalo de valores, como función de flujo</b> |             |                  |
|---|--|-------------|------------------|
|   | <b>Qprom</b>                                       | <b>Qmáx</b> | <b>Qpico (*)</b> |
| Carga volumétrica hidráulica (kg DQO/m <sup>3</sup> *d) | < 4  | < 6         | < 7              |
| Tiempo de retención hidráulica (h)**                    | 6,0 - 9,0  | 4,0 - 6,0   | > 3,5 - 4,0      |
| Velocidad de flujo ascendente (m/h)                     | 0,5 - 0,7  | < 0,9 - 1,1 | < 1,5            |

\* Flujo pico con duración de 2 a 4 horas

\*\*Temperatura del agua residual entre 20 y 26°C

Fuente: Comisión Nacional de Agua

Cuadro 24. Criterios hidráulicos del reactor UASB existente en la planta

| <b>Criterio/Parámetro</b>                               | <b>Rango de valores</b> |
|---|-------------------------|
| Carga volumétrica hidráulica (kg DQO/m <sup>3</sup> *d) | 0,2-1,7                 |
| Tiempo de retención hidráulica (h)                      | 14-100                  |
| Velocidad de flujo ascendente (m/h)                     | 0,04-0,28               |

En el Cuadro 24 se aprecian los criterios hidráulicos del reactor UASB de los cuales se cumple el rango de la carga volumétrica hidráulica, los tiempos de retención hidráulica son mucho mayores a los rangos establecidos y en el caso de la velocidad de flujo ascendente los rangos en el reactor son menores a los deseados.

Cuadro 25. Criterios de diseño para reactores anaerobios de flujo ascendente para aguas residuales domésticas

| <b>Criterio</b>                 | <b>Parámetros</b>   | <b>Intervalos de valores</b> |
|---------------------------------|---|------------------------------|
| Altura (m)                      | Reactor   | 3,0 - 6,0                    |
|                                 | Compartimiento del sedimentador   | 1,5 - 2,0                    |
|                                 | Compartimiento del digester   | 2,5 - 3,5                    |
| Remoción de DQO esperada        | Remoción esperada para agua residual diluida (%)  | 60 - 70                      |
|                                 | Remoción esperada para agua residual concentrada (%)  | 80 - 90                      |
| Distribución del afluente       | Diámetro del tubo de distribución del afluente (mm)   | 75 - 100                     |
|                                 | Diámetro de la desembocadura del tubo de distribución (mm)  | 40 - 50                      |
|                                 | Distancia entre la parte superior del tubo de distribución y el nivel de agua en el sedimentador (m)            | 0,2 - 0,3                    |
|                                 | Distancia entre la desembocadura y la parte inferior del reactor (m)  | 0,1 - 0,15                   |
|                                 | Área de influencia de cada tubo de distribución (m <sup>2</sup> )   | 2,0 - 3,0                    |
| Colector de biogás              | Tasa de liberación mínima de biogás (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)  | 1,0                          |
|                                 | Tasa de liberación máxima de biogás (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)  | 3,0 - 5,0                    |
|                                 | Concentración de metano en el biogás (%)  | 70 - 80                      |
| Compartimiento de sedimentación | Superposición de los deflectores de gas en relación con la abertura para el compartimiento de sedimentación (m) | 0,1 - 0,15                   |
|                                 | Pendiente mínima de las paredes del sedimentador (°)  | 45                           |
|                                 | Pendiente óptima de las paredes del sedimentador (°)  | 50 - 60                      |
|                                 | Profundidad del compartimiento del sedimentador (m)   | 1,5 - 2,0                    |
| Colector del efluente           | Inmersión del deflector de nata en el perforado de tubos de recolección (m)                                     | 0,2 - 0,3                    |
|                                 | Número de vertedores triangulares (unidades /m <sup>2</sup> del reactor)  | 1,0 - 2,0                    |
| Producción y muestreo del lodo  | Rendimiento de la producción de sólidos (kgSST/kgDQOaplicada)   | 0,1 - 0,2                    |
|                                 | Rendimiento de la producción de sólidos (kgDQOlodo/kgDQOaplicada)   | 0,11 - 0,23                  |
|                                 | Concentración de sólidos esperado en el exceso de lodo (%)  | 2,0 - 5,0                    |
|                                 | Densidad del lodo (kg/m <sup>3</sup> )  | 1020 - 1040                  |
|                                 | Diámetro tuberías de descarga del lodo (mm)   | 100 - 150                    |
|                                 | Diámetro tuberías de muestreo de lodo (mm)  | 25 - 50                      |

Fuente: Comisión Nacional de Agua, 2016

Cuadro 26. Valores de diseño del reactor UASB en la planta de tratamiento de Santa Cecilia

| <b>Criterio</b>                 | <b>Parámetros</b>  | <b>Valor</b> | <b>Cumple</b> |
|---------------------------------|--|--------------|---------------|
| Altura (m)                      | Reactor  | 4,0          | OK            |
|                                 | Compartimiento del digestor  | 2,83         | OK            |
|                                 | Remoción esperada para el agua residual diluida (%)  | **           | -             |
| Remoción de DQO esperada        | Remoción esperada para el agua residual concentrada (%)  | 20,1         | NO            |
|                                 | Diámetro del tubo de distribución del afluente (mm)  | 100          | OK            |
| Distribución del afluente       | Diámetro de la desembocadura del tubo de distribución (mm)   | 100          | NO            |
|                                 | Distancia entre la parte superior del tubo de distribución y el nivel de agua en el sedimentador (m)     | **           | OK            |
|                                 | Distancia entre la desembocadura y la parte inferior del reactor (m)                                     | 0,2          | OK            |
|                                 | Área de influencia de cada tubo de distribución (m <sup>2</sup> )  | 0,875        | NO            |
| Colector de biogas              | Tasa de liberación mínima de biogas (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)                                   | **           | -             |
|                                 | Tasa de liberación máxima de biogas  | **           | -             |
|                                 | Concentración de metano en el biogas   | **           | -             |
| Compartimiento de sedimentación | Superposición de los deflectores de gas en relación con la abertura para compartimiento de sedimentación | 0,2          | NO            |
|                                 | Pendiente de las paredes del sedimentador (°)  | 45           | OK            |
|                                 | Profundidad del compartimiento del sedimentador (m)  | 0,85*        | NO            |
| Colector del efluente           | Inmersión del deflector de nata en el perforado de tubos de recolección (m)                              | No hay       | -             |
|                                 | Número de vertedores triangulares (unidades/m <sup>2</sup> del reactor)                                  | **           | -             |
| Producción y muestreo del lodo  | Rendimiento de la producción de sólidos (kgSST/kgDQOaplicada)  | **           | -             |
|                                 | Rendimiento de la producción de sólidos (kgDQOlodo/kgDQOaplicada)  | **           | -             |
|                                 | Concentración de sólidos en el exceso de lodos (%)   | **           | -             |
|                                 | Densidad del lodo (kg/m <sup>3</sup> )   | **           | -             |
|                                 | Diámetro tuberías de descarga del lodo (mm)  | 100          | OK            |
|                                 | Diámetro tuberías de muestreo del lodo (mm)  | 100          | NO            |

\*Cómo el valor no está especificado en planos se supone un valor esperado de 30% la altura del digestor

\*\* No se presentan valores en planos o no se midió en campo

En el Cuadro 26 se presentan los valores de diseño del reactor UASB en la planta de Santa Cecilia, y se compara con los rangos de valores presentados en el Cuadro 25 para ver si estos cumplen o no con los valores dados.

Las dimensiones especificadas corresponden a los valores de los planos facilitados por el AyA, debido a que no se pudo realizar la corroboración de las dimensiones internas del sistema de

forma directa; además, no se realizaron ensayos con respecto a las mediciones de lodos y de gases, y no se cuenta con evaluaciones de los mismos por parte de AyA; por lo tanto estos valores no se pueden comparar con lo esperado para el diseño.

Las tuberías con diámetros fuera del rango establecido, son de tamaño superior a este, en el caso en que puede generar mayor problema es en la entrada al reactor; debido a que el diámetro afecta la velocidad de entrada, y además se debe considerar que los caudales de la planta son muy bajos para el volumen del reactor, lo que produce velocidades de flujo ascendente mucho menores a los valores deseados.

Con respecto al área de influencia de los tubos de distribución se utiliza un total de seis tubos de entrada, que se presentan simétricamente distribuidos por lo que se supone que cada uno presenta la misma área de influencia, estos valores son inferiores a los establecidos por diseño, pero se adaptan a las áreas esperadas para la carga orgánica volumétrica con respecto a los diferentes tipos de lodos presentes en un reactor.

Cuadro 27. Retiros mínimos a linderos de propiedad

| <b>Tipo de tratamiento</b> | <b>Condición</b> | <b>Retiro mínimo (m)</b> | <b>Cumple</b> |
|----------------------------|------------------|--------------------------|---------------|
| Reactores Anaerobios       | Cerrados         | 10                       | OK            |
| Filtros biológicos         | -                | 20                       | OK            |
| Sedimentadores             | Abiertos         | 20                       | OK            |
| primarios y secundarios    | Cerrados         | 10                       | OK            |

Cuadro 28. Rotulación de tuberías

| <b>Uso de la tubería</b>               | <b>Color</b> | <b>Cumple</b> |
|--|--------------|---------------|
| Aguas residuales crudas                | Negro        | NO            |
| Recirculación de lodos                 | Amarillo     | No hay        |
| Purga de lodos, natas y otros desechos | Naranja      | NO            |
| Gas                                    | Rojo         | No hay        |
| Agua potable                           | Azul         | No visible    |
| Cloro y otros desinfectantes           | Café         | No hay        |
| Aguas tratadas                         | Gris         | **            |
| Aire comprimido                        | Verde        | No hay        |

\*\* Las nuevas tuberías colocadas a la salida del filtro si cumplen, pero en el resto de la planta se usan tuberías verdes

En el Cuadro 27 se puede observar que los retiros mínimos sí se cumplen para todos los sistemas existentes, lo que evita molestias a los vecinos que colindan con la propiedad.

Mientras que en el Cuadro 28 se aprecia que la planta no sigue la nomenclatura de colores de la tubería, excepto en el caso de los sistemas colocados más recientemente, como el filtro percolador, para el cual se reemplazó el color de la tubería verde por una tubería de color gris para el agua tratada que sale del filtro.

Cuadro 29. Cumplimiento de las obligaciones del ente generador

| <b>Condición</b>   | <b>Cumple</b>                         |
|--|---------------------------------------|
| Contar con personal y equipo requeridos en todo momento        | Se trabaja una jornada de 6 am a 6 pm |
| Operación y mantenimiento con respecto al manual               | OK*                                   |
| Mantener un efluente con concentraciones dentro de los límites | NO                                    |
| Muestreos y análisis con el tiempo requerido                   | NO                                    |
| Seguimiento del manual de operación y mantenimiento            | OK                                    |
| Bitácora de operación y mantenimiento                          | OK                                    |
| Cumplir con reglamento de vertido y reuso                      | NO                                    |

\* Cumple las frecuencias de mantenimiento, excepto por la purga de lodos

En el Cuadro 29 se presentan las obligaciones del ente operador, el personal se encuentra presente en una jornada de 12 horas de 6 am a 6 pm, lo que indica que hay 12 horas continuas en que la planta no cuenta con inspección.

No todos los parámetros medidos cumplen con los límites de vertido, además los muestreos del Laboratorio Nacional de Aguas se realizan semestralmente, no trimestralmente como se recomienda.

## **CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### **5.1. ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO**

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) suministró datos históricos tomados a la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Cecilia de Puriscal, los cuales se enfocan principalmente en la calidad de agua a la entrada de la planta y la calidad del vertido.

A partir de los datos suministrados se selecciona un periodo desde el 8 de abril del 2010 al 14 de junio del 2018, debido a la falta de valores en varias de las pruebas, algunas de las fechas de muestreo suministradas fueron descartadas.

A continuación, se presentan los gráficos de dispersión obtenidos de las pruebas realizadas y en los casos en que aplique, se colocaron los valores límites presentados en el reglamento de vertido y reúso de aguas residuales.

#### **5.1.1 Nitrógeno**

En la Figura 56 y en la Figura 57 no se presentan comportamientos constantes de los valores de nitrato y el nitrógeno amoniacal en el vertido, debido a que a lo largo del tiempo en que se han realizado estos análisis de laboratorio, la conducta de ambos es variable, esto puede deberse a la duración del proceso de oxidación en cada caso, debido a que la descomposición de la materia orgánica no siempre tarda lo mismo y, además, la cantidad de residuos en el caudal de entrada no es constante.

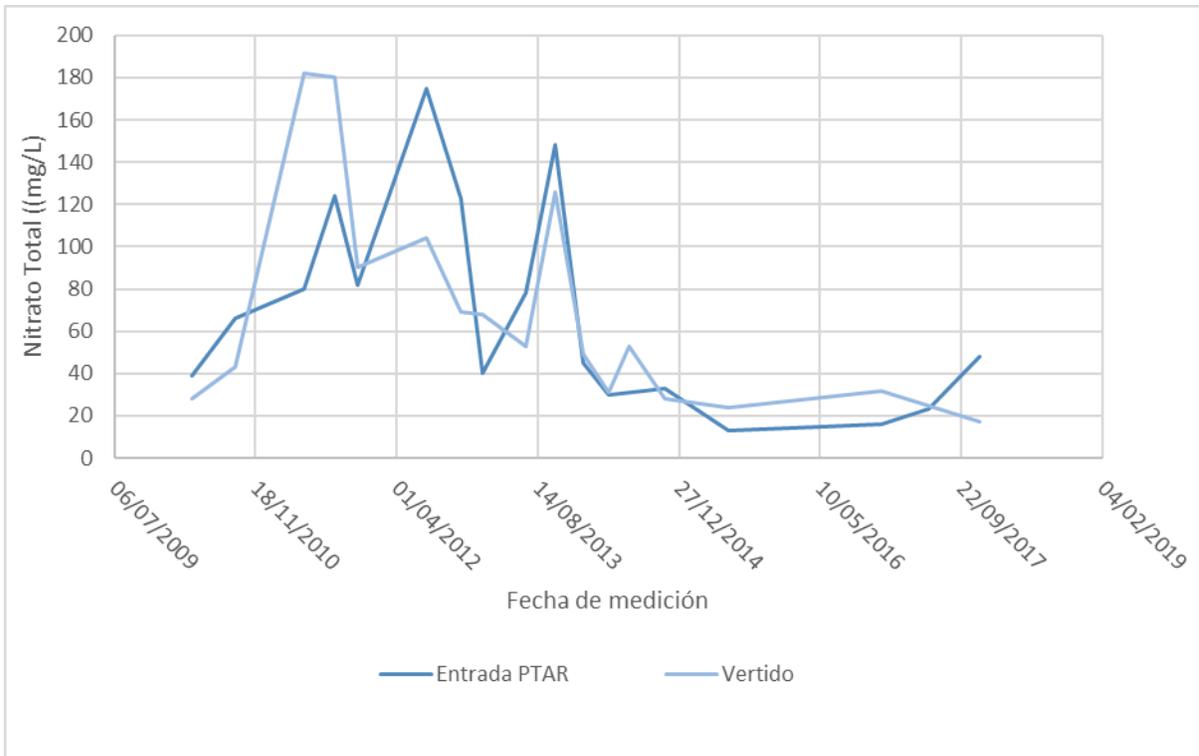


Figura 56. Gráfico de dispersión del Nitrato Total

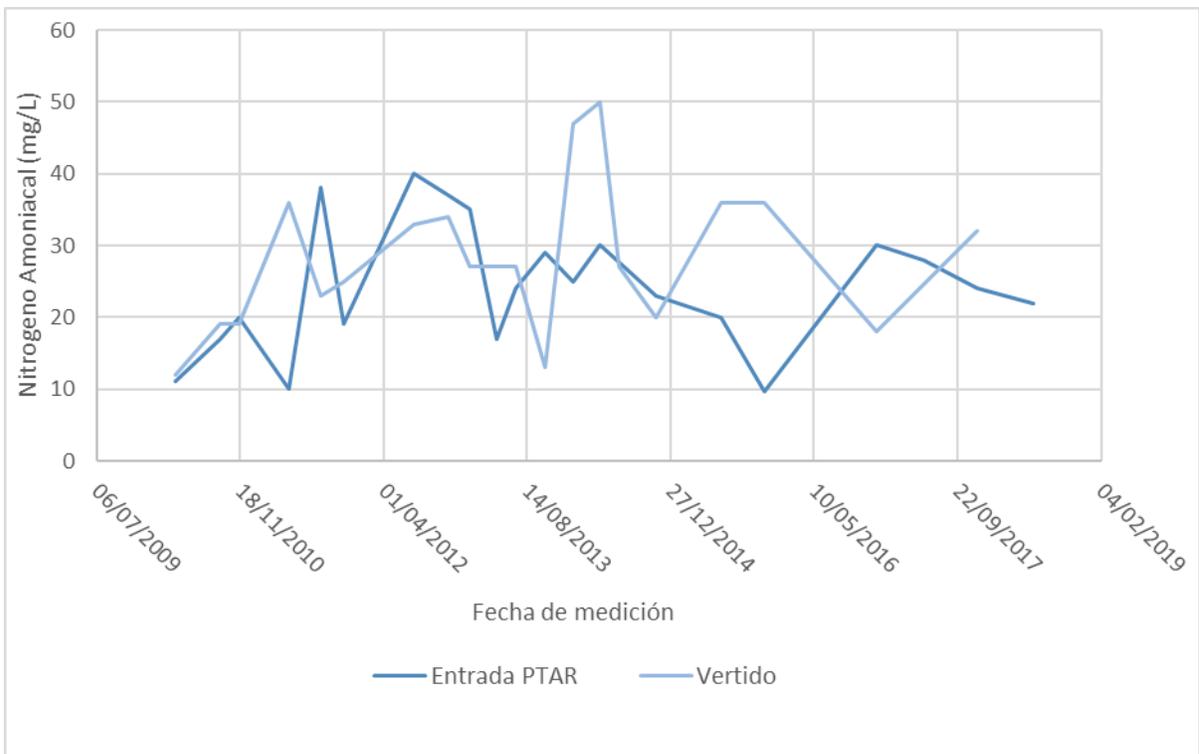


Figura 57. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Amoniacal

Según el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601 con respecto a los valores de nitrógeno total, cuyo límite máximo permitido es de 50 mg/L, se puede observar en Figura 58 que con respecto a los datos de vertido en el cuerpo de agua superficial, una gran mayoría de estos superan el límite establecido por ley, esto puede ocasionar sobrepoblación de algas y plantas acuáticas sobre todo ante la presencia de altas concentraciones de nitratos que ocasionan el crecimiento de las plantas y la eutrofización, lo que reduce la cantidad de oxígeno disuelto en el cuerpo receptor y afecta de esa forma la fauna que reside en el sitio.

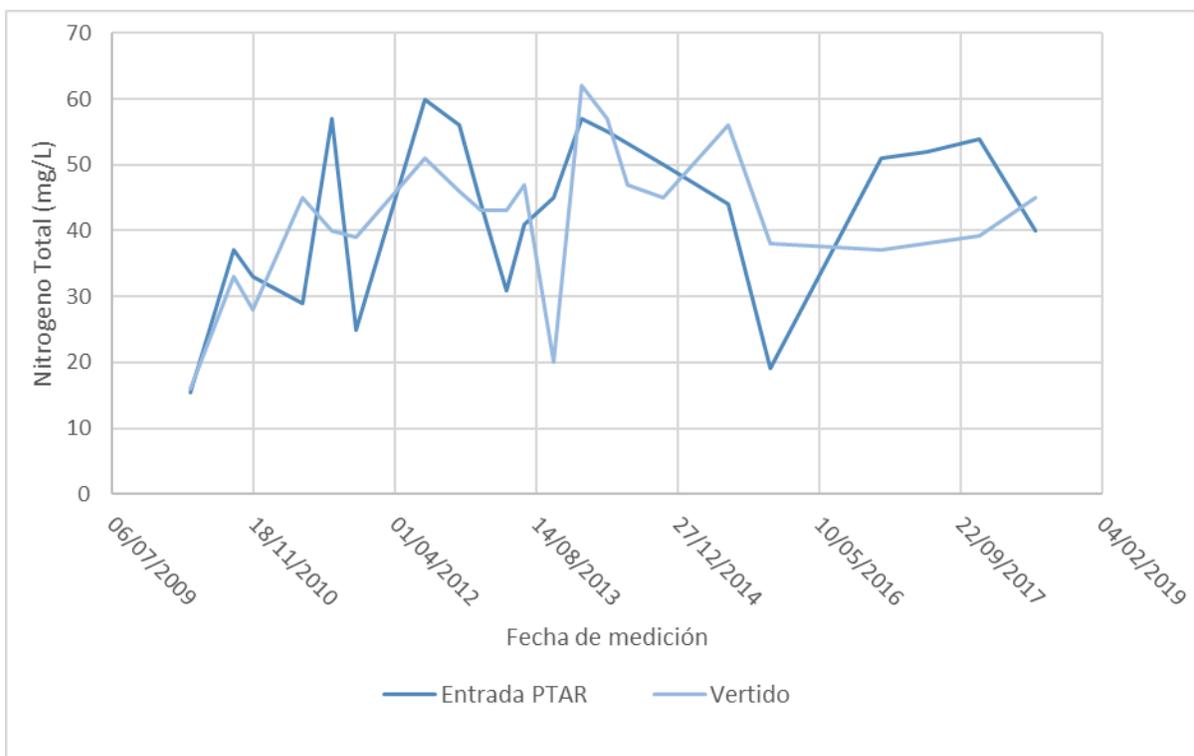


Figura 58. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Total

### 5.1.2 Fósforo

El fósforo al igual que el nitrógeno ayuda al crecimiento de las plantas acuáticas, por ende una cantidad alta de este elemento promueve el consumo en exceso del oxígeno disuelto. El punto de vertido de la planta de tratamiento funciona como una fuente puntual de contaminación; pero no se puede constatar que esta sea la única fuente de contaminación del río Chuba

Con respecto a los valores establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601, el valor de límite máximo para los fosfatos es de 25 mg/L, que

comparado con los valores que se aprecian en la Figura 59, cumple con los requisitos ya que el valor mayor no supera los 20 mg/L.

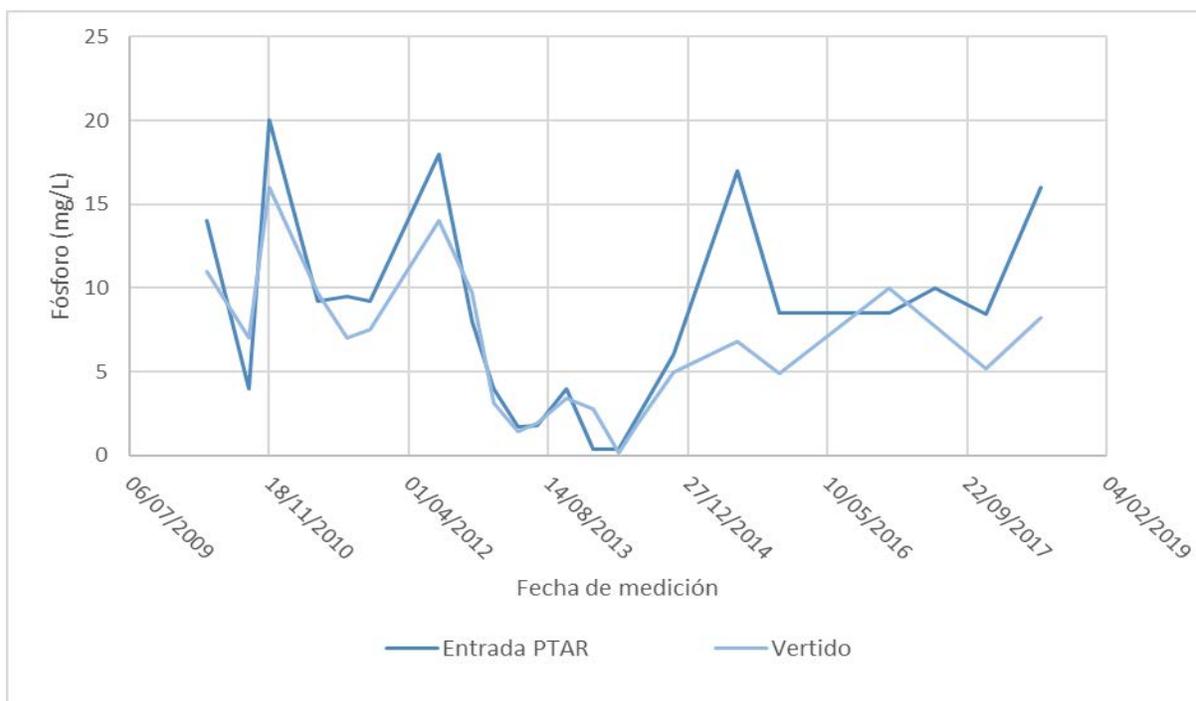


Figura 59. Gráfico de dispersión del Fósforo

### 5.1.3 Sólidos suspendidos sedimentables

Se puede observar en la Figura 60 que, en general, los sólidos suspendidos sedimentables se encuentran bajo el valor establecido por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601 en cuerpos de aguas superficiales, que corresponde a 1 mg/L, lo que indica que con respecto a la eliminación de sólidos sedimentables en la planta de tratamiento, el proceso se está desarrollando de una manera aceptable y se presentan mejores valores entre los años 2013 y 2014.

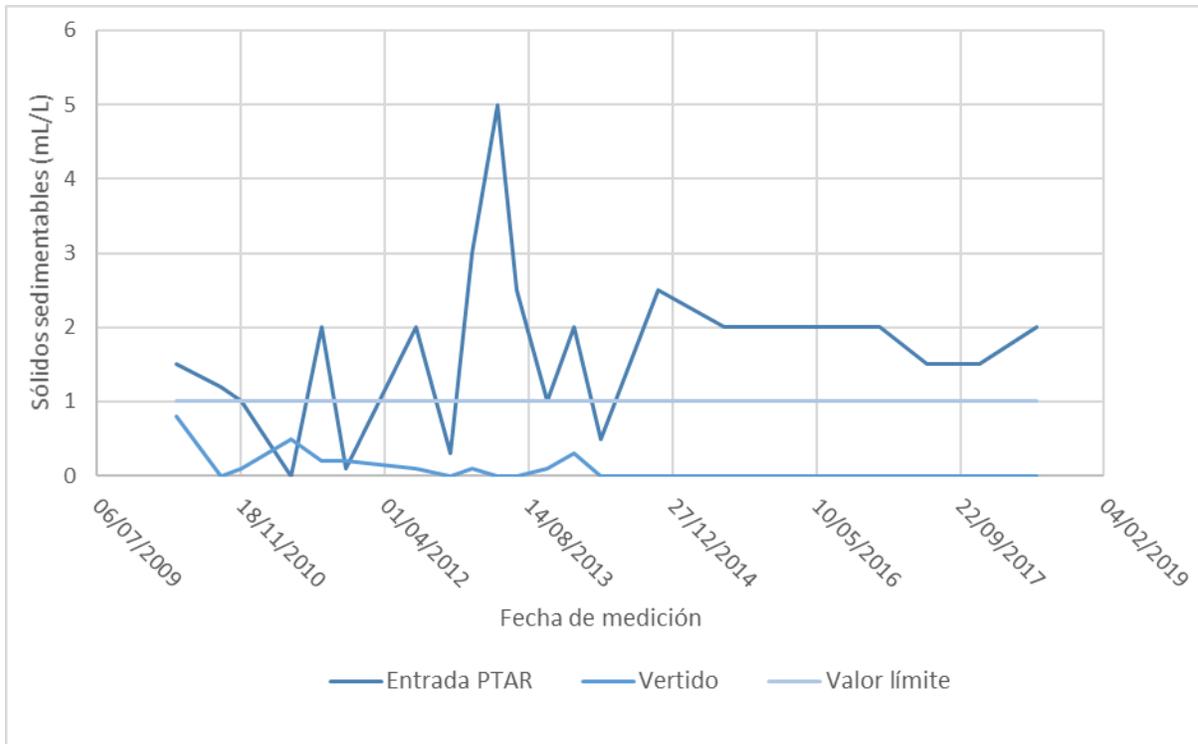


Figura 60. Gráfico de dispersión de los Sólidos Sedimentables

#### 5.1.4 Sólidos Suspendidos Totales

Con respecto a los sólidos suspendidos totales, los valores sí exceden los límites permitidos por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601 que establece el límite en 50 mg/L, y por lo que se puede observar en la Figura 61, el proceso ayuda a disminuir los valores, pero no lo suficiente para cumplir con los valores reglamentarios.

Al igual que en los sólidos sedimentables se aprecia una disminución de SST entre los años 2013 y 2014, periodo durante el cual se presenta una tendencia más estable en los valores de entrada y de vertido de la PTAR, con menos variaciones entre las mediciones en comparación a los años anteriores.

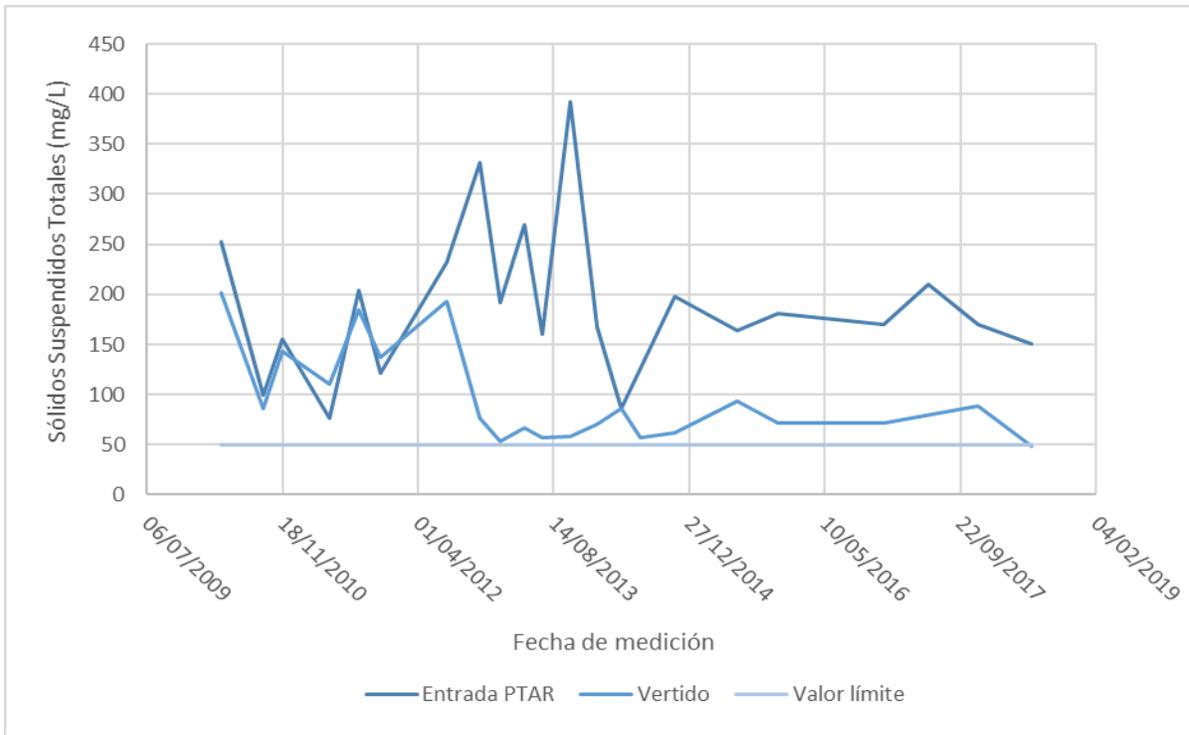


Figura 61. Gráfico de dispersión de los Sólidos Suspendedos Totales, con valor límite según reglamento

### 5.1.5 Sólidos Totales

Se observa en la Figura 62 el comportamiento de los sólidos totales, que considera los sólidos filtrables y no filtrables. Se puede observar que en algunos casos los valores de vertido superan los valores de entrada y esto puede deberse a los sólidos presentes en el sedimentador secundario, por desprendimientos en el filtro o por resuspensión de partículas en el reactor UASB.

No se presenta una tendencia de disminución de sólidos totales constante al comparar los datos de la entrada con la salida de la PTAR, los valores de vertido más altos se encuentran entre los años 2012 y 2013, superando los valores de entrada.

Esto puede implicar que en el cuerpo de agua se vea afectada la penetración de la luz y por ende la flora y la fauna no se desarrollen de la forma adecuada, además, altas concentraciones de sólidos totales pueden afectar el funcionamiento de los sistemas de la planta de tratamiento.

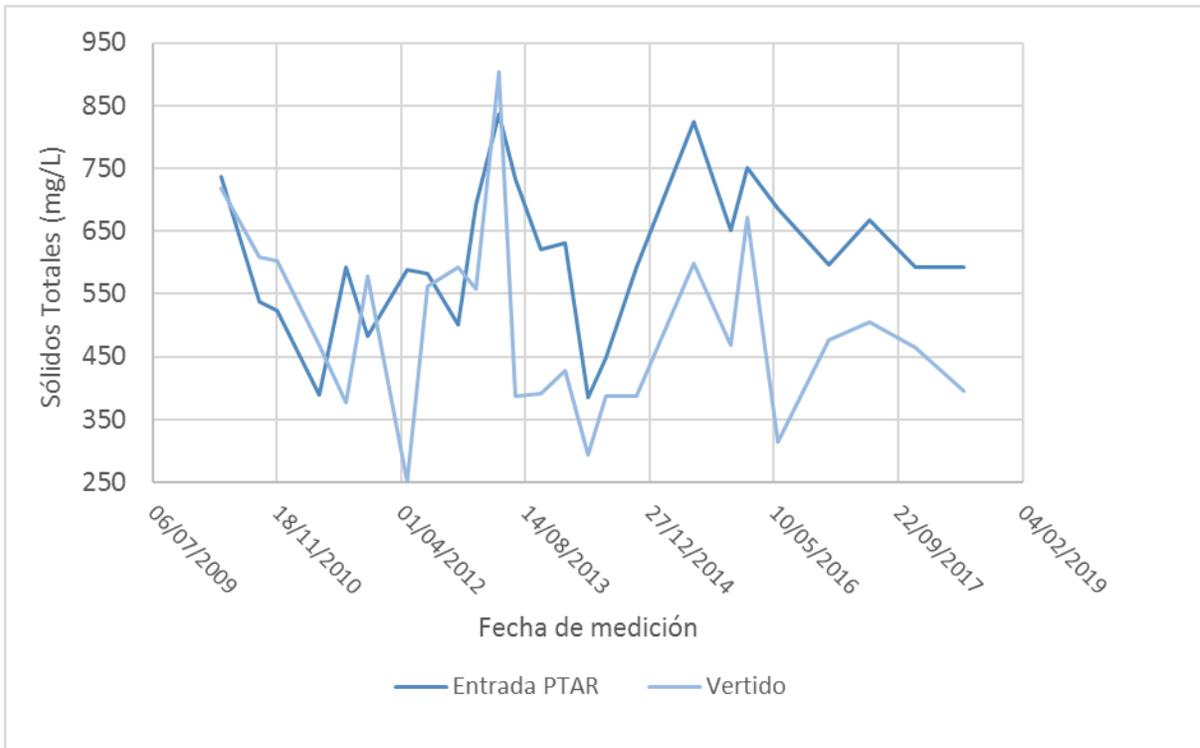


Figura 62. Gráfico de dispersión de los Sólidos Totales

### 5.1.6 Coliformes fecales

Los valores de vertido no cumplen con los límites establecidos por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601 que establece un límite de 1000 coliformes por cada 100 mL de agua, debido a que la mayoría de las muestras superan este valor; esto puede implicar la presencia de otros patógenos que afecten a la salud, el riesgo es alto debido a que los coliformes fecales pueden sobrevivir en el agua y son termo resistentes.

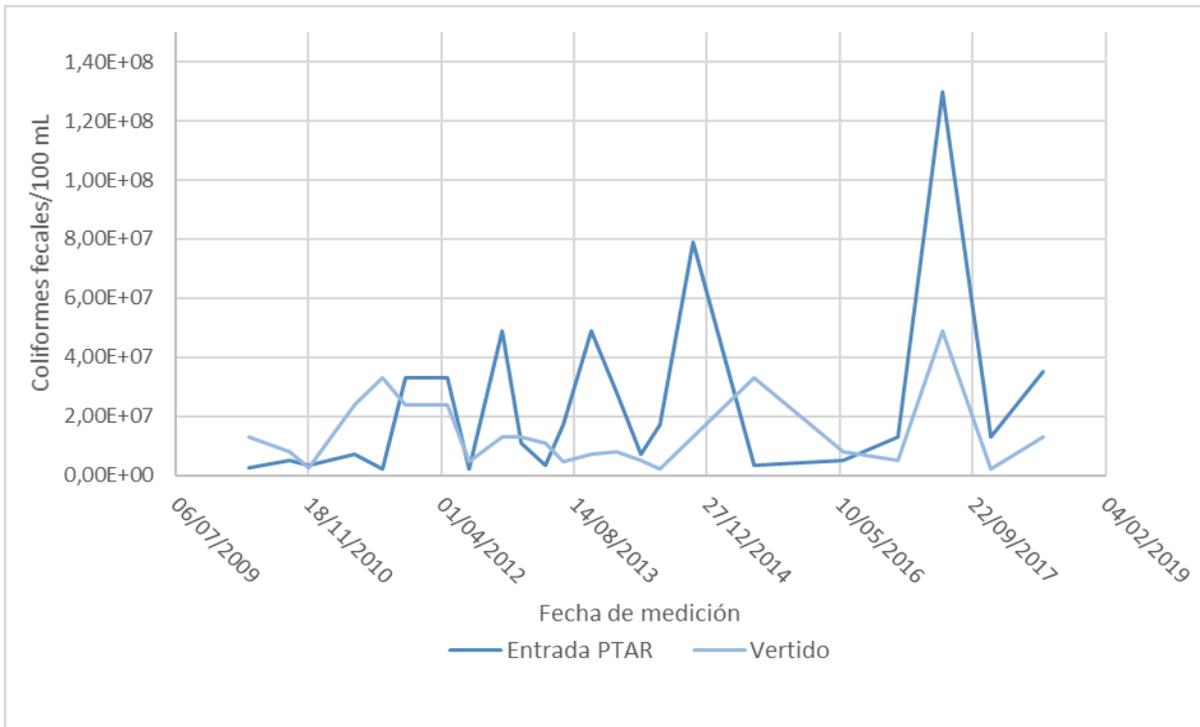


Figura 63. Gráfico de dispersión de los Coliformes Fecales

### 5.1.7 Potencial de hidrógeno

Se puede observar en la Figura 64 que los valores de potencial de hidrógeno (pH) al salir en el vertido se obtienen valores cercanos al neutro lo que mejora la calidad del agua a la salida, los rangos se mantienen dentro de los límites del Reglamento, por lo que no afecta con el desarrollo de microorganismos para el tratamiento de aguas residuales.

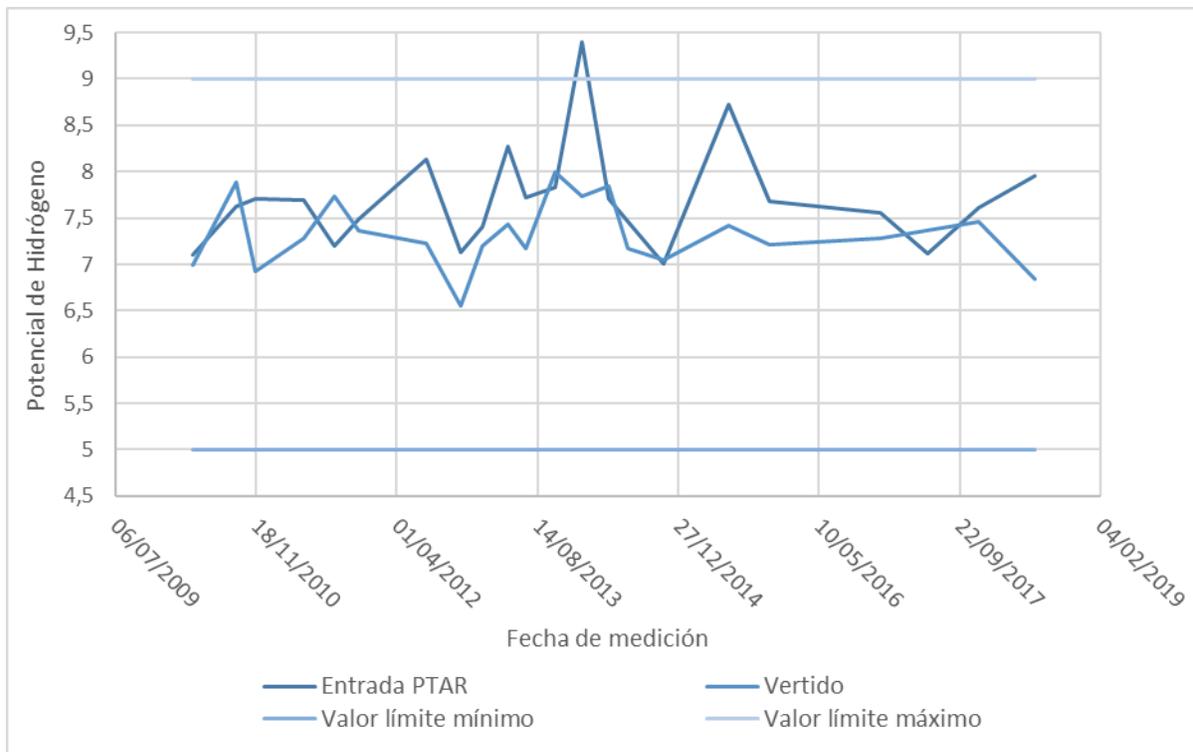


Figura 64. Gráfico de dispersión del Potencial de Hidrógeno con valores límite según reglamento

### 5.1.8 Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

En la Figura 65 y en la Figura 66 se observan los comportamientos históricos de DBO y DQO, en ambos casos es visible como en la mayoría de las mediciones no se cumplen los límites de vertido establecidos en el Reglamento, esto afecta las condiciones del cuerpo de agua superficial, debido a que consumen una alta cantidad del oxígeno disuelto presente en el medio, alterando las condiciones de vida y desarrollo de las especies presentes.

Entre los años 2013 y 2014 se presenta una reducción considerable de los valores de DQO, cumpliendo en algunas mediciones con los valores límite, mientras que previo a esto los datos históricos de vertido llegaban a superar los 300 mg/L.

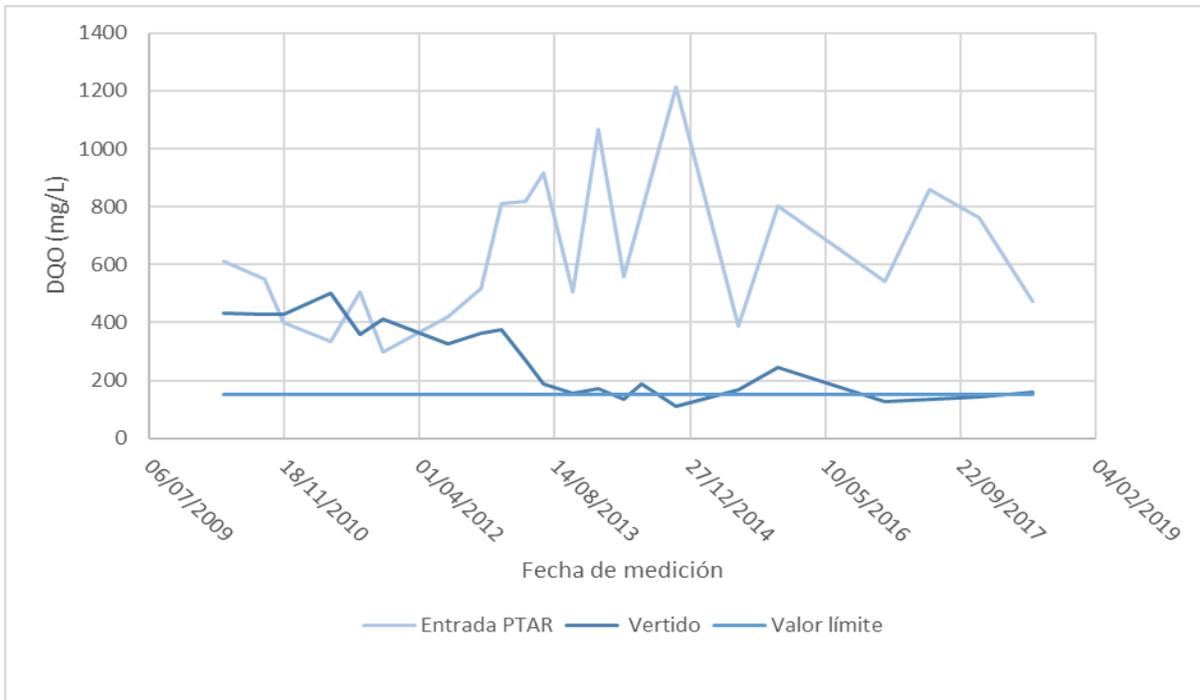


Figura 65. Gráfico de dispersión de la Demanda Química de Oxígeno, con valor límite según reglamento

Al igual que en el caso de DQO, para el DBO se presenta una reducción considerable de los valores en el mismo periodo de tiempo, pero en ningún caso, había cumplido con el Reglamento y previo a este periodo los datos superaban los 200 mg/L.

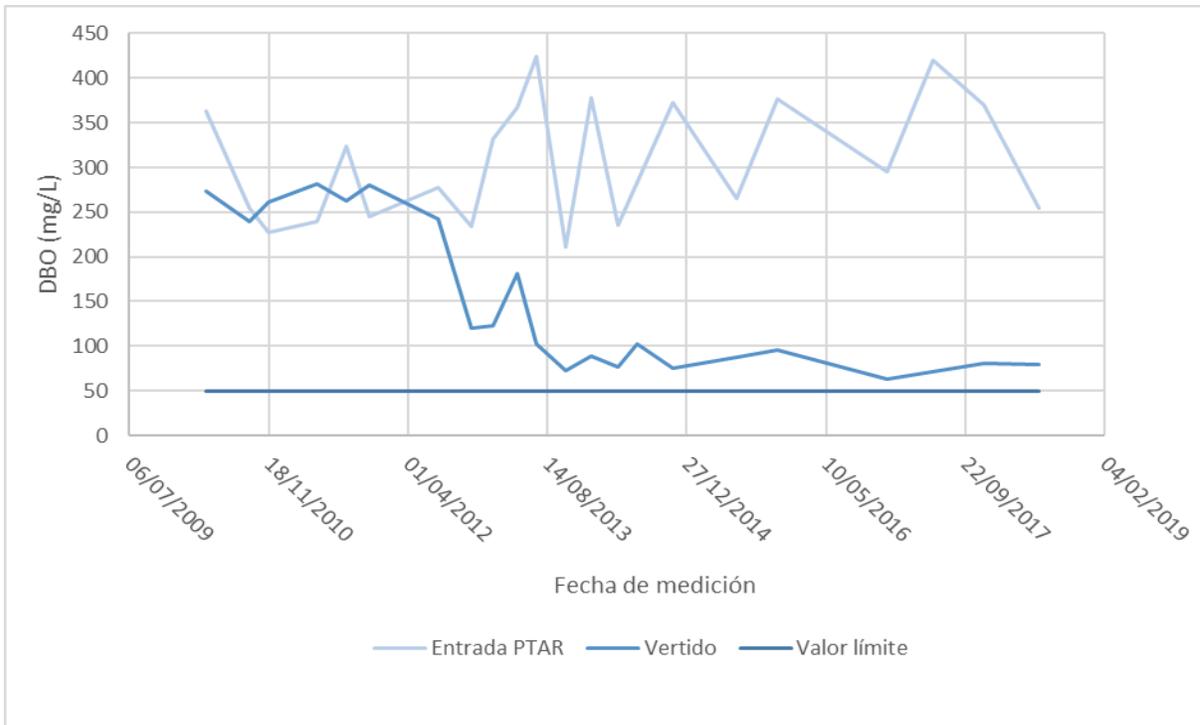


Figura 66. Gráfico de dispersión de la Demanda Biológica de Oxígeno, con valor límite según reglamento

En la Figura 67 se observan las relaciones entre el DBO y DQO, según el Cuadro 2 la contaminación presente en el agua residual varía entre biodegradable y muy biodegradable, los valores de entrada y salida no presentan un comportamiento constante.

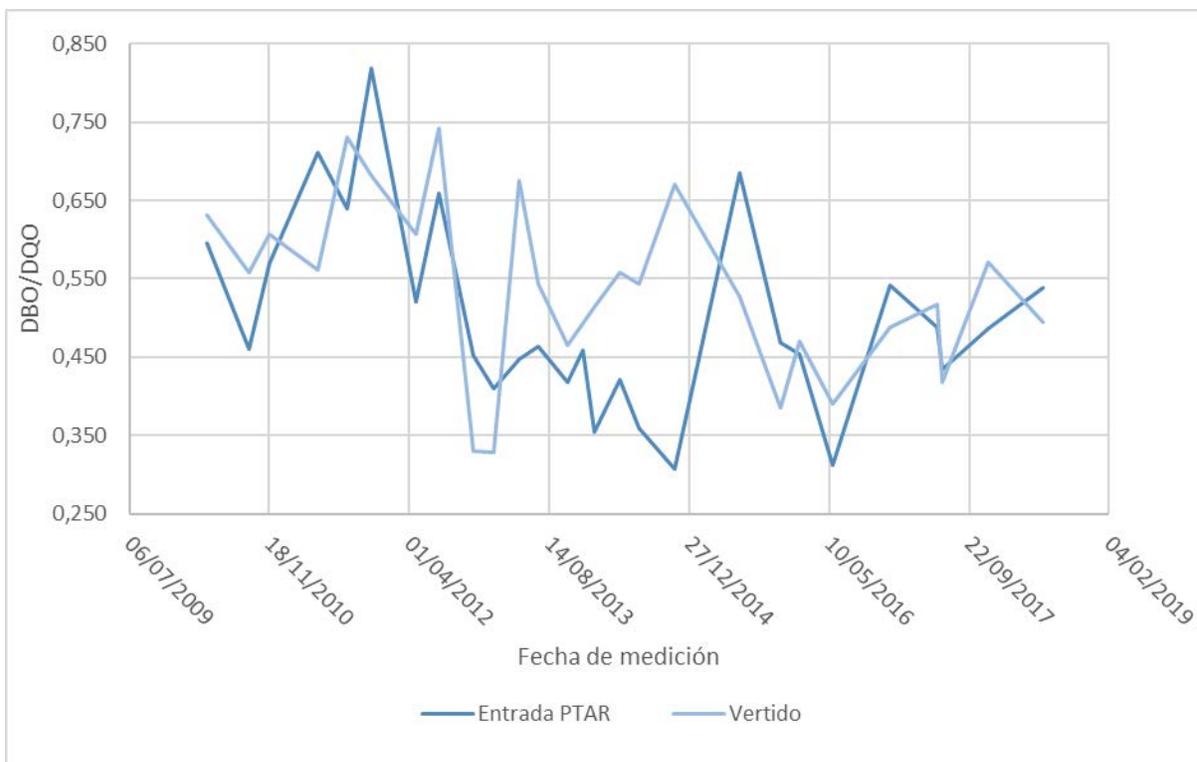


Figura 67. Gráfico de dispersión de la relación de DBO/DQO

## 5.2. ANÁLISIS DE DATOS MEDIDOS EN CAMPO

Se recolectaron muestras de diferentes puntos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Santa Cecilia de Puriscal (mencionados previamente) con el objetivo de verificar la calidad del agua y las eficiencias de remoción de los sistemas UASB y filtro percolador existentes, durante un periodo de estudio que comprendió del 22 de marzo al 15 de mayo del año 2019.

Las pruebas se realizaron durante la misma semana de cada muestreo a excepción de las pruebas de DBO, debido a que estas abarcan un periodo de 5 días para la obtención del dato a analizar.

Algunas de las pruebas se tuvieron que repetir para verificar los valores obtenidos debido a que presentaban variaciones importantes con el resto de los datos.

Los valores se presentan utilizando gráficos de dispersión y gráficos de cajas con respecto a los muestreos realizados, para los casos en que se presentan límites establecidos por el

Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.° 33601, se grafica también dicho valor para una mejor apreciación de cumplimiento del reglamento de vertido y reúso vigente.

Se tomaron en consideración para el análisis los datos del primer muestreo, previo a la colocación de la esponja como material de soporte para poder comparar los efectos del uso de estos en el filtro percolador.

Los cuadros con todos los valores medidos se encuentran en los Anexos al final del presente documento.

### **5.2.1 Temperatura**

En la Figura 68 se puede observar que los valores de temperatura más altos se encuentran en la entrada de la planta, mientras que los valores más bajos se encuentran en el vertido, los valores en cada sistema cumplen con las temperaturas esperadas para el correcto funcionamiento de los mismos. Para el vertido, los valores cumplen con los límites establecidos en el Reglamento para no afectar las condiciones en el cuerpo receptor.

Según el Cuadro 4, las eficiencias de los sistemas podrían mejorar si los rangos de temperatura se localizaran en el rango de los 25 °C a 35 °C, los valores más altos de temperatura se presentan a la entrada de la planta, seguidos del reactor UASB, las altas temperaturas en el reactor favorecen las reacciones químicas, y se disminuye la presencia del oxígeno disuelto, lo que favorece la proliferación de bacterias anaerobias.

En el caso del filtro percolador las temperaturas bajan debido a que se requiere la presencia de oxígeno disuelto que permite la formación de la biopelícula brindándole las condiciones adecuadas para el desarrollo de bacterias aerobias que consuman la biomasa contenida en el afluente.

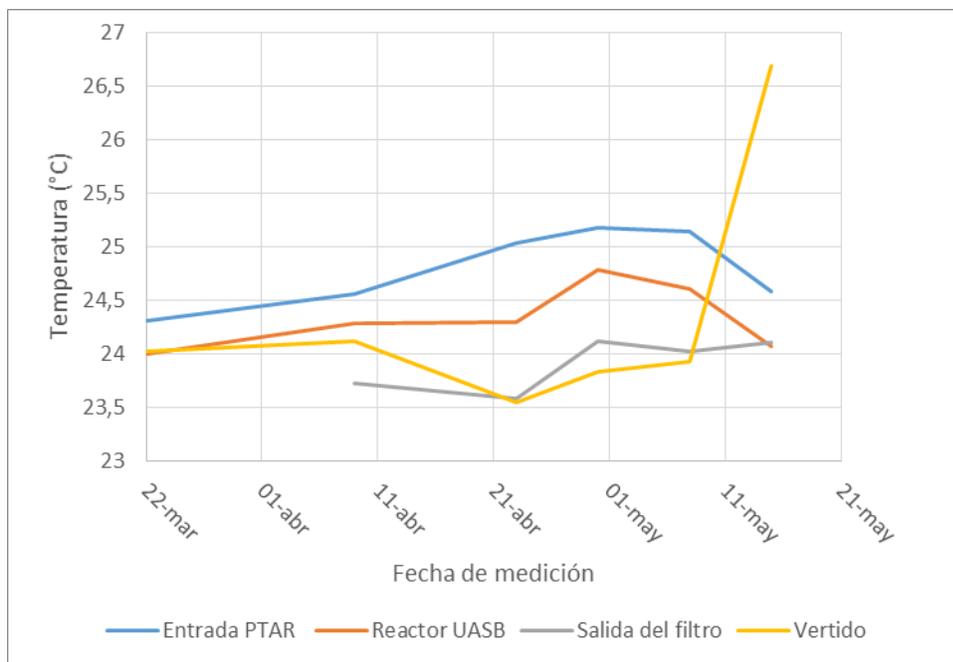


Figura 68. Gráfico de dispersión de temperatura en todos los puntos de medición en campo

En la Figura 69 se muestra que en la fase experimental la temperatura a la entrada de la planta es superior a la del vertido, excepto en la última medición, en el caso del valor obtenido por AyA el valor de temperatura en el vertido es mayor que a la entrada. Se observa, además, que en todos los casos, la temperatura del vertido cumple con los límites que establece el Reglamento.

En el caso del vertido la temperatura puede afectar las condiciones de vida y propagación de las especies de flora y fauna existentes en el cuerpo de agua superficial al cual desemboca.

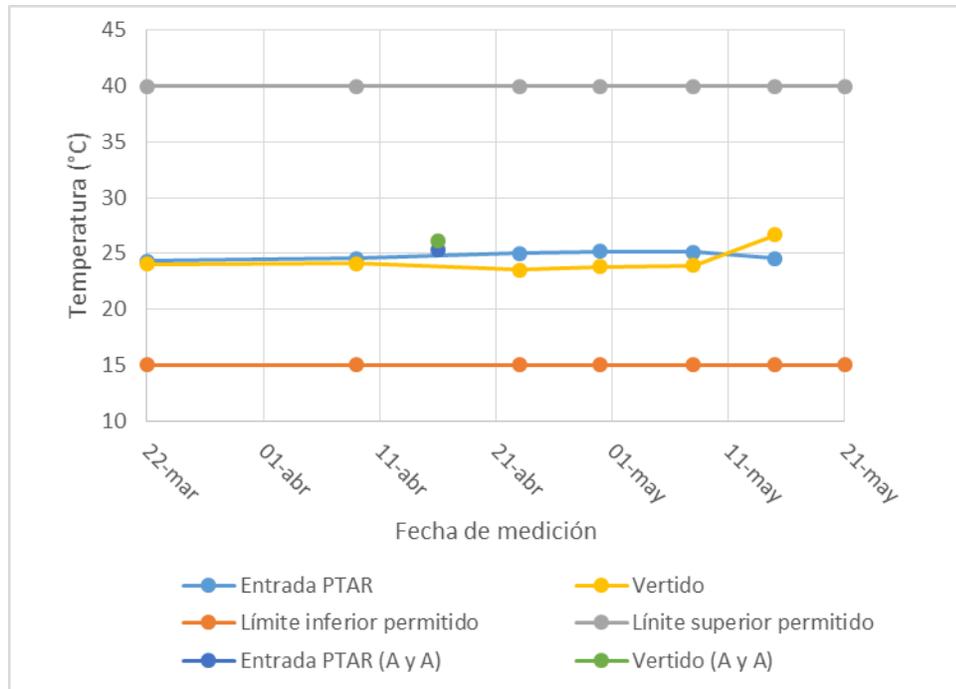


Figura 69. Gráfico de dispersión de temperatura en la entrada y vertido de la planta y valores límites según reglamento

### 5.2.2 Oxígeno disuelto

Los valores de oxígeno disuelto se presentan en la Figura 70, se observan que los valores más altos se obtienen en el vertido, con comportamiento similar en la salida del filtro, esto debido a los procesos aerobios del sistema, los valores en el reactor UASB es de 0 mg/L, lo cual concuerda con un proceso anaerobio.

Para el caso del sistema aerobio de filtro percolador, valores de oxígeno disuelto mayores de 2,0 mg/L se consideran satisfactorios para el proceso de crecimiento de bacterias, según lo observado los valores que se obtienen a la salida del filtro son considerados aceptables.

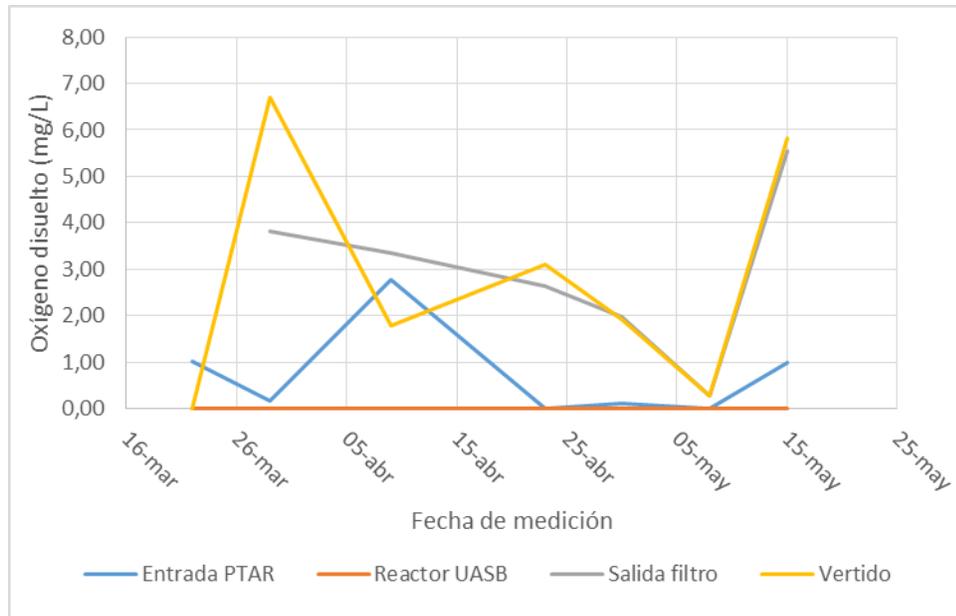


Figura 70. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto en todos los puntos de medición en campo

### 5.2.3 Conductividad

En la Figura 71 se puede observar que el valor de conductividad en la entrada de la planta es mayor en la medición dada por el AyA, mientras que en el vertido, el valor es semejante a la tendencia que llevan los valores medidos en la fase experimental.

Los valores de conductividad más altos se localizan en el reactor UASB, indicando que en este sistema hay una mayor cantidad de sólidos disueltos; se puede observar, además, que los valores obtenidos a la salida del filtro y en el vertido son muy similares, lo que indica que el sedimentador secundario no presenta sales ni una cantidad de sólidos disueltos que cambien de forma importante la conductividad en el agua tratada.

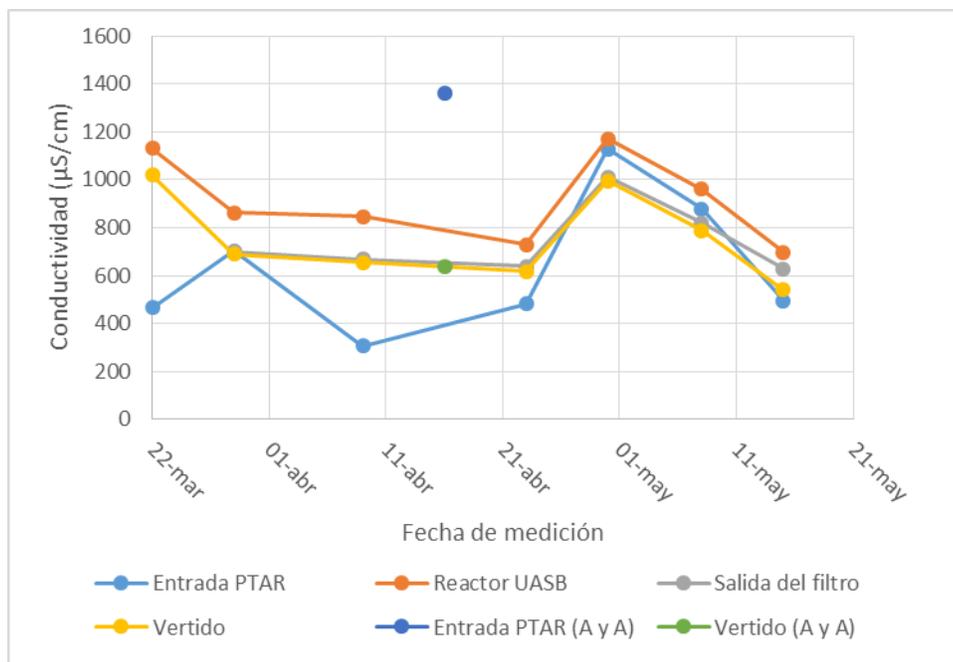


Figura 71. Gráfico de dispersión de conductividad en todos los puntos de muestreo

#### 5.2.4 Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno representa una condición de interés en los sistemas de tratamiento, debido a que los valores cerca del neutro propician la proliferación de los organismos biológicos necesarios para el correcto tratamiento del agua. En la Figura 72 se observan los valores de pH más estables se dan en la salida del filtro y los más inestables en el reactor UASB, esta condición puede afectar el proceso de tratamiento biológico.

Los valores de pH en el vertido oscilan entre 6,5 y 8,0 acercándose más al límite superior; pero sin presentar condiciones de alerta. En la salida del filtro los valores se encuentran entre 7,0 y 7,5 lo que representa un comportamiento más constante de este parámetro.

En la entrada de la planta y en el reactor UASB se aprecian mayores variaciones entre los muestreos realizados, y no se puede establecer una tendencia clara de comportamiento de los valores de este parámetro en estos puntos.

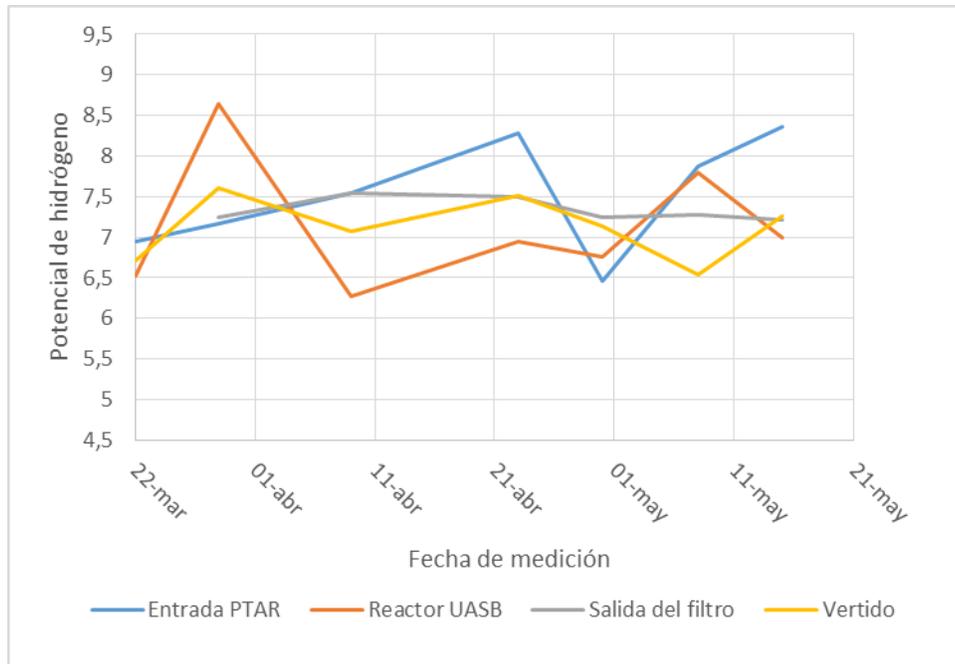


Figura 72. Gráfico de dispersión de potencial de hidrógeno en todos los puntos de medición en campo

En la Figura 73 se aprecia que los valores de potencial de hidrógeno en el agua residual varían en el caso de la entrada y salida, como se pudo apreciar también en los resultados históricos brindados por AyA, pero al igual que en estos, los valores no sobrepasan los límites de vertido y se localizan cerca del valor neutro, con una tendencia más estable que en el caso de la entrada a la planta.

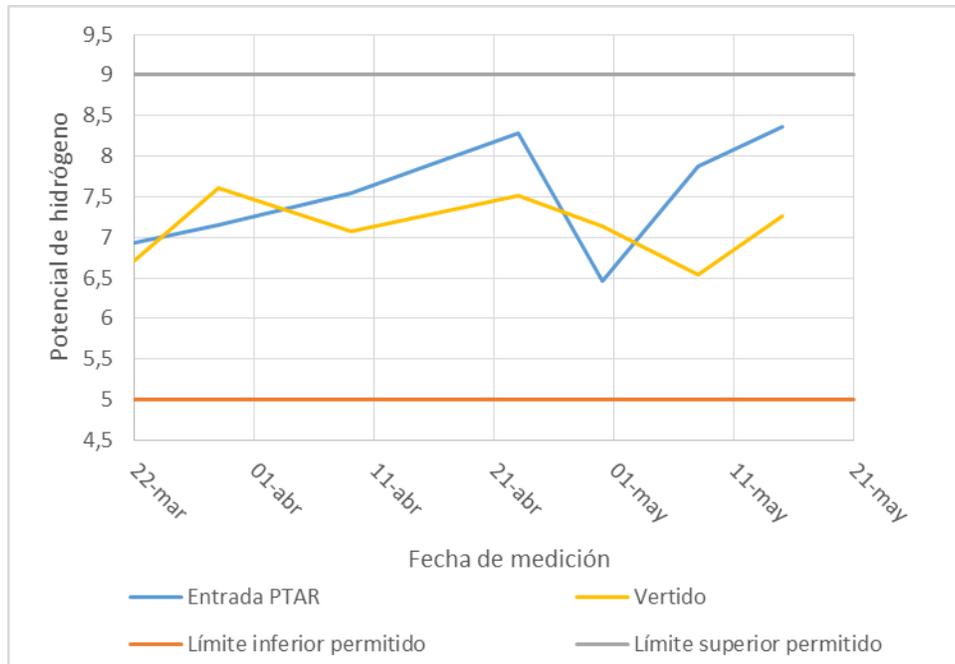


Figura 73. Gráfico de dispersión de potencial de hidrógeno en todos los puntos de medición en campo y valores límite según reglamento

### 5.3. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL UCR

#### 5.3.1 Nitrógeno

En la Figura 74 se presentan los valores de nitrato en cada punto, los valores aceptables para el agua superficial es inferior a los 45 mg/L, para que no afecte la vida acuática, el nitrato se obtiene después de la oxidación de los nitritos.

La presencia más baja de estos nutrientes se encuentra en la válvula 5, esto debido a que en los lodos del reactor no hay presencia de oxígeno, en la salida del filtro y el vertido se encuentran en general valores mayores y esto debido a que son producto de procesos aerobios.

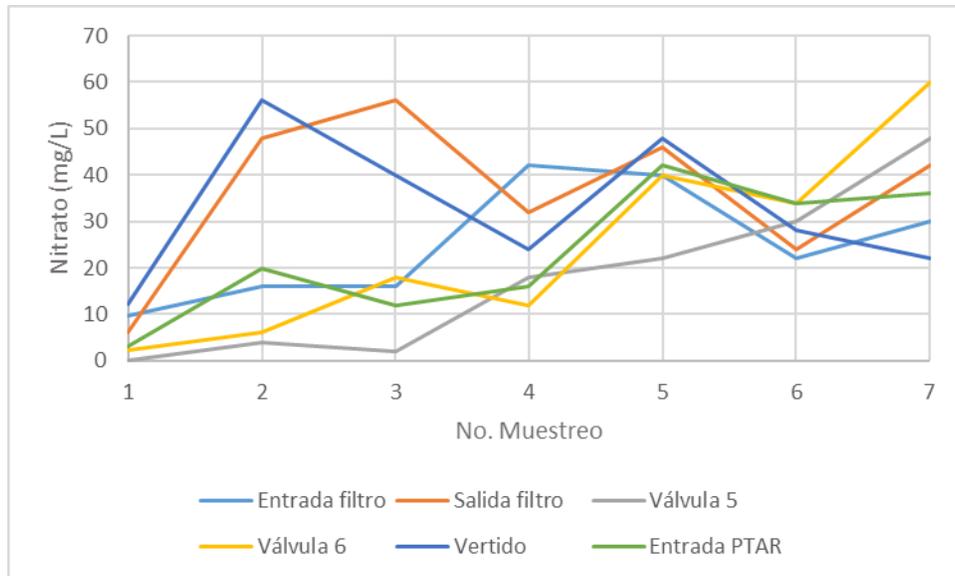


Figura 74. Gráfico de dispersión del nitrato en todos los puntos medidos.

Los valores de nitrito obtenidos en los muestreos se presentan en la Figura 75, son inferiores a los valores de nitrato y esto viene relacionado con el hecho de que la formación de nitritos es más lenta que la formación de nitratos; las mayores concentraciones, se ubican al igual que los nitratos, en la salida del filtro y el vertido.

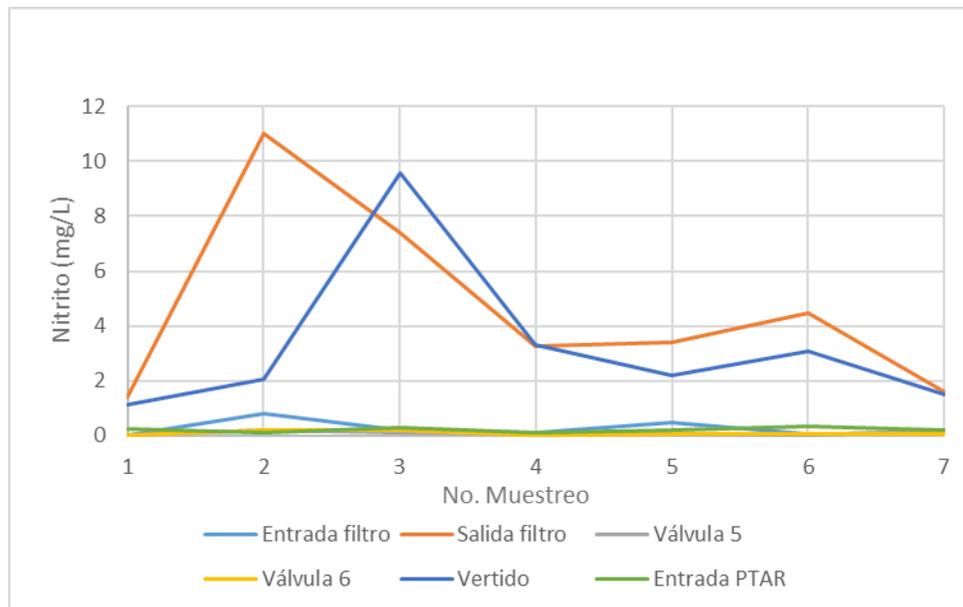


Figura 75. Gráfico de dispersión del nitrito en todos los puntos medidos.

En la Figura 76 se presentan los valores de nitrógeno amoniacal, siendo estos más altos en las válvulas, caso contrario a los nitratos y nitritos, y esto se debe al proceso de desnitrificación que ocurre como parte de un proceso anaerobio, en la salida del filtro se presentan los valores más bajos debido a la aireación externa que entra en el sistema.

Los valores de nitrógeno amoniacal en el reactor UASB deberían tener valores altos debido a que la medición de OD en la parte interna del mismo es de 0 mg/L, lo que implica que no hay nitrificación; pero debido a que los valores de salida del reactor UASB se tomaron en los tubos rociadores del filtro, se pudo producir oxigenación en la muestra de agua residual tomada.

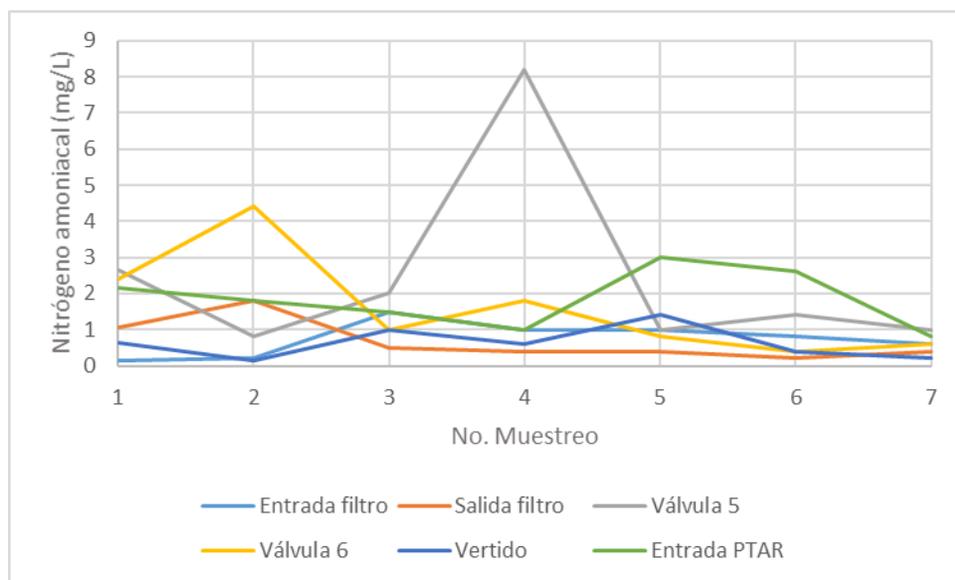


Figura 76. Gráfico de dispersión del nitrógeno amoniacal en todos los puntos medidos.

En la Figura 77 se puede ver que en la entrada de la planta se producen variaciones en el nitrato y nitrógeno amoniacal con respecto a la presencia de oxígeno disuelto, pero los valores son en general menores a los del vertido, como es de esperarse, ya que al tratarse el agua disminuye la cantidad de materia orgánica presente que consume el OD.

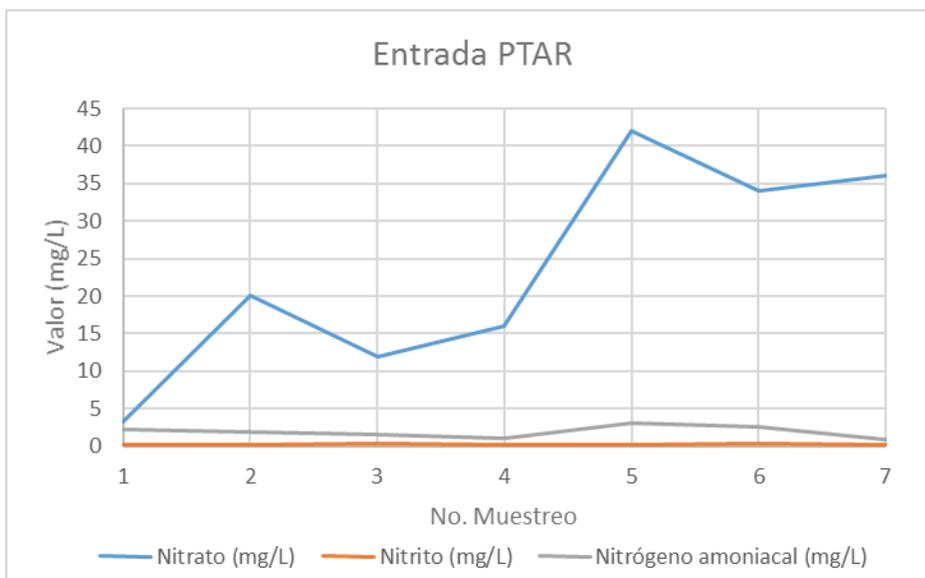


Figura 77. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la entrada de la planta

Debido a que los valores presentados en la Figura 78 corresponden a la salida del reactor UASB se esperarían valores de nitrógeno amoniacal mayores, ya que al ser un proceso anaerobio no debería presentar nitrificación; pero el comportamiento observado no es igual al esperado y esto puede deberse a la oxigenación que sufre el agua residual al salir por los orificios del filtro percolador.

Se puede observar que, en el caso del nitrógeno amoniacal, se localiza por encima de los valores de nitrito, por la falta de oxigenación en el reactor UASB y debido a que la velocidad de formación de nitritos es menor a la de formación de nitratos y el nitrógeno amoniacal no ha tenido tiempo de oxidarse.

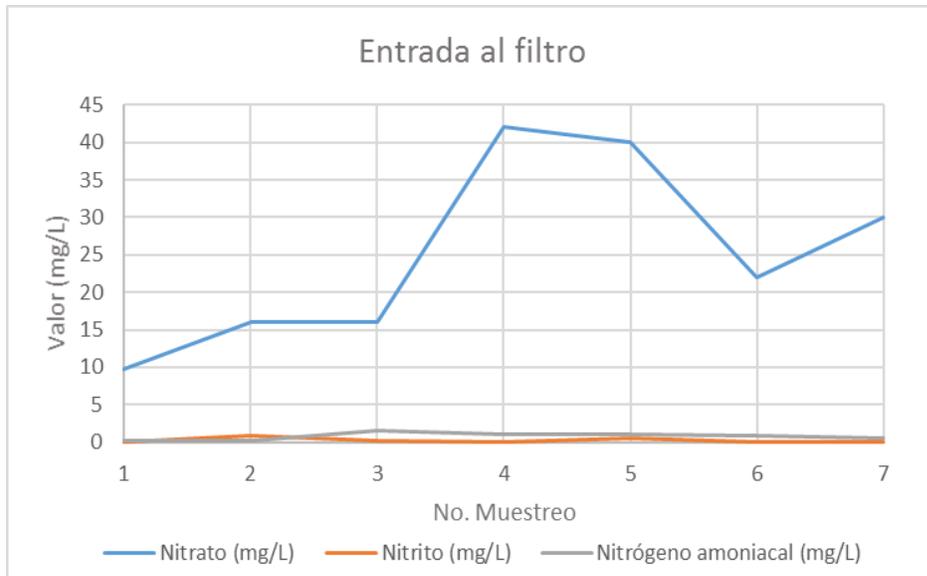


Figura 78. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la entrada del filtro

Los resultados observados en la Figura 79 a la salida del filtro, presentan un comportamiento esperado con respecto a la nitrificación, ya que los valores presentes de nitrógeno amoniacal son los más bajos medidos, casi aproximándose a cero y esto debido al comportamiento aerobio del sistema de filtro percolador. Los valores de nitrito son inferiores a los de nitrato porque su formación toma más tiempo.

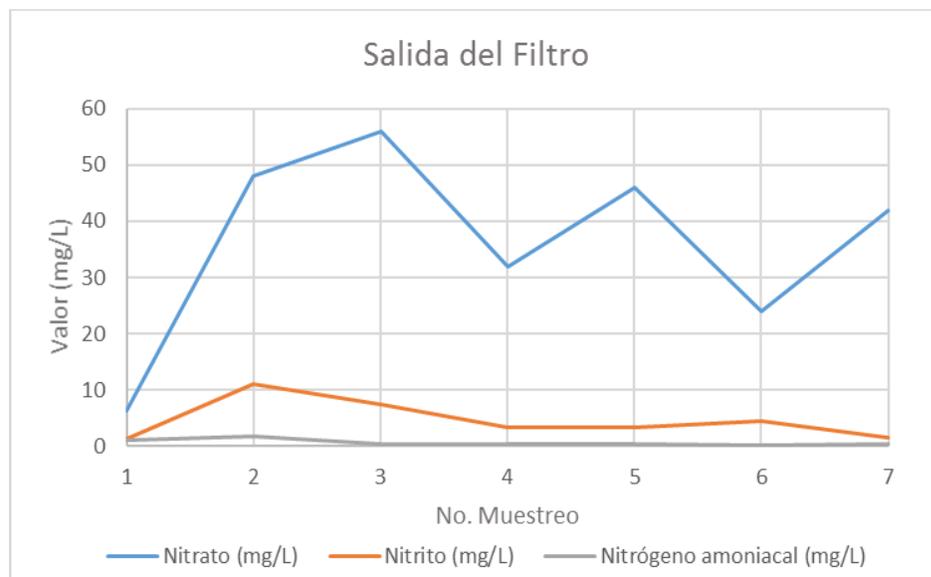


Figura 79. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la salida del filtro

En la Figura 80 y la Figura 81 se observan los comportamientos de desnitrificación en las válvulas del reactor UASB, en estos puntos el OD presente se espera que sea 0 mg/L, ya que en la parte superior del reactor, ese es el valor que presenta y no hay entrada de oxígeno en el sistema. Los valores de nitrato, en general, en los primeros muestreos, tienen valores significativamente más bajos que en otros puntos de muestreo, y presenta una condición de ascenso que puede deberse a cargas biológicas más altas producto de disminuciones en el caudal.

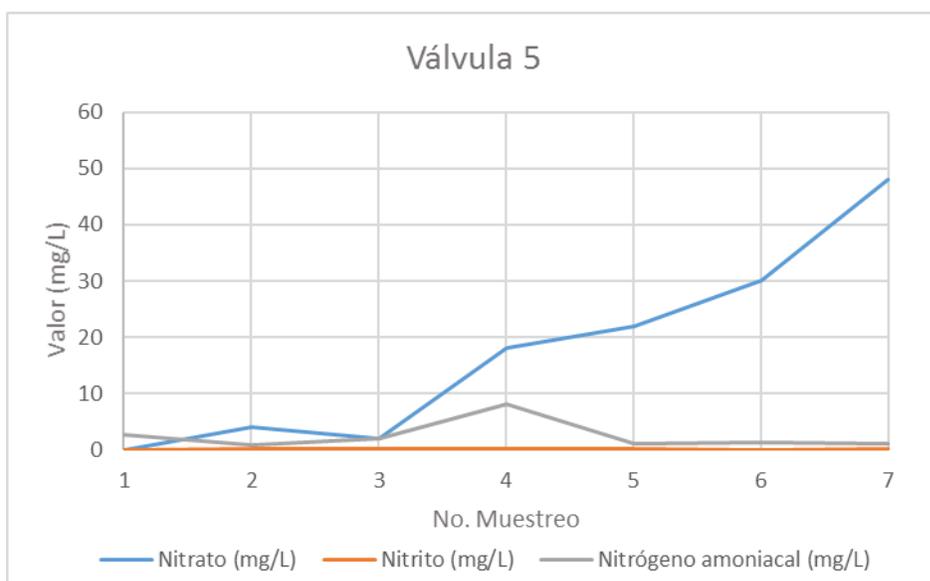


Figura 80. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la válvula 5

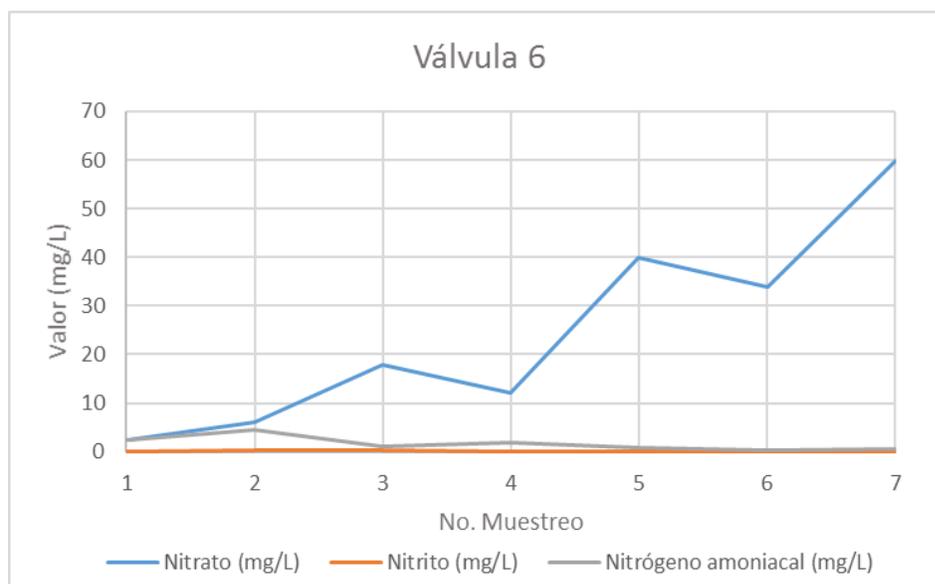


Figura 81. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en la válvula 6

En la Figura 82 se observa el comportamiento de nitrificación en el vertido, los valores de nitrógeno amoniacal son los más bajos debido a la oxidación del nitrógeno, los valores en general son similares a los observados en la salida del filtro.

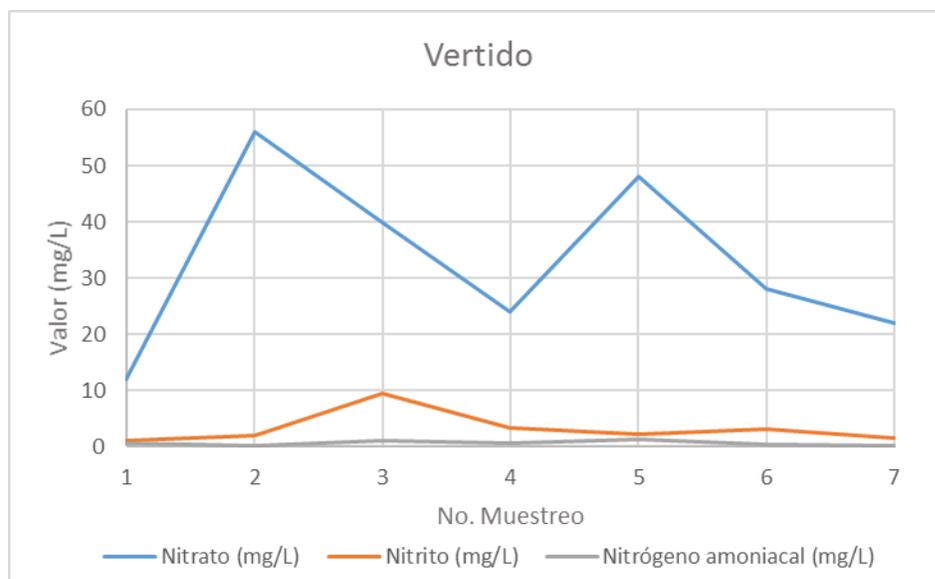


Figura 82. Gráfico de comparación de los valores de nitrificación en el vertido

Según lo que se puede apreciar en la Figura 83 los valores de nitrato son menores en la entrada de la planta y mayores en las últimas fases del tratamiento, a la salida del filtro y en el vertido, a pesar de que el rango de valores entre estos es muy similar, al comparar los valores de la mediana de cada uno, la salida del filtro posee una mayor cantidad de mediciones con concentraciones más altas, mientras que en el vertido la mitad de las mediciones tiene concentraciones más bajas.

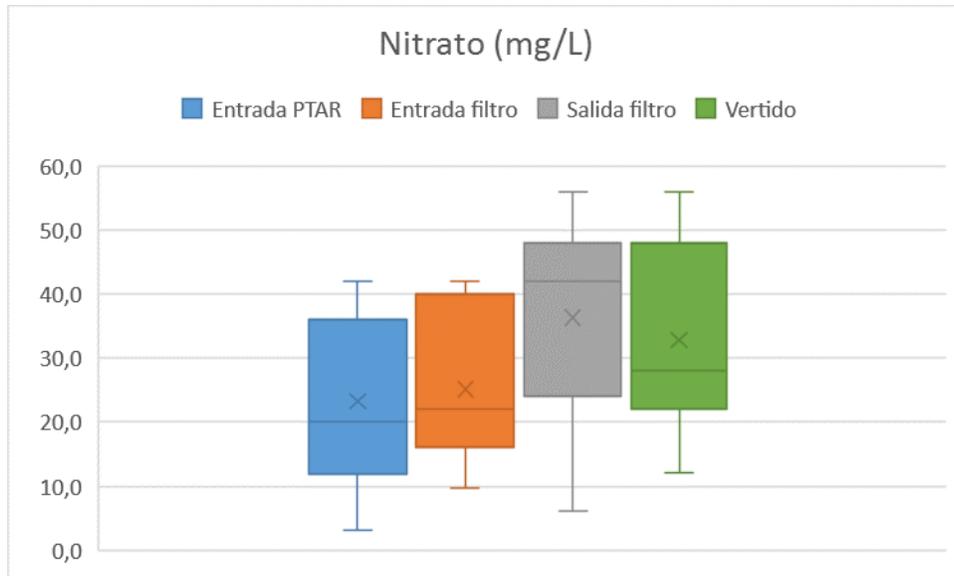


Figura 83. Gráfico de cajas de Nitrato de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

Con respecto a las concentraciones de nitrito, se puede observar en la Figura 84 que las concentraciones más bajas se encuentran en la entrada de la planta y las concentraciones más altas a la salida del filtro, junto a un valor de excepción que se presenta en el vertido de 9,55 mg/L, a pesar de que la salida del filtro presente valores mayores, la mitad de las mediciones dieron valores inferiores a 3,40 mg/L.

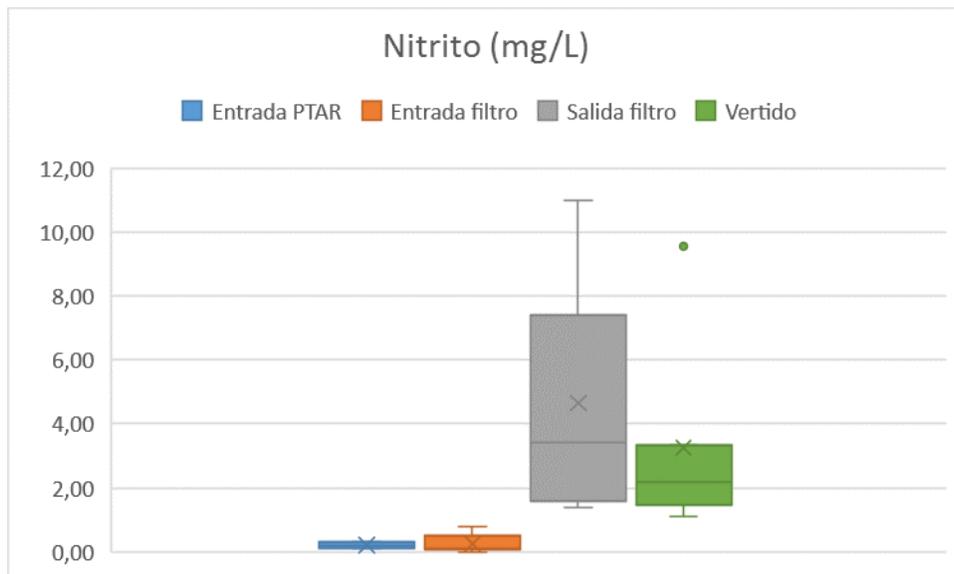


Figura 84. Gráfico de cajas de Nitrito de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

Los valores de nitrógeno amoniacal son los más bajos en comparación con el nitrito y el nitrato que es el que presenta los valores mayores. En la Figura 85 se puede apreciar que la mayor concentración de nitrógeno amoniacal se localiza en la entrada a la planta, lo que es esperable, debido a que las concentraciones de nitrato y nitrito eran las menores en comparación con los otros puntos de muestreo, con respecto a los demás puntos de muestreo los rangos de valores son muy similares, las concentraciones menores se obtienen a la salida del filtro donde la mitad de los valores muestreados están por debajo de 0,4 mg/L que coincide con el primer cuartil.

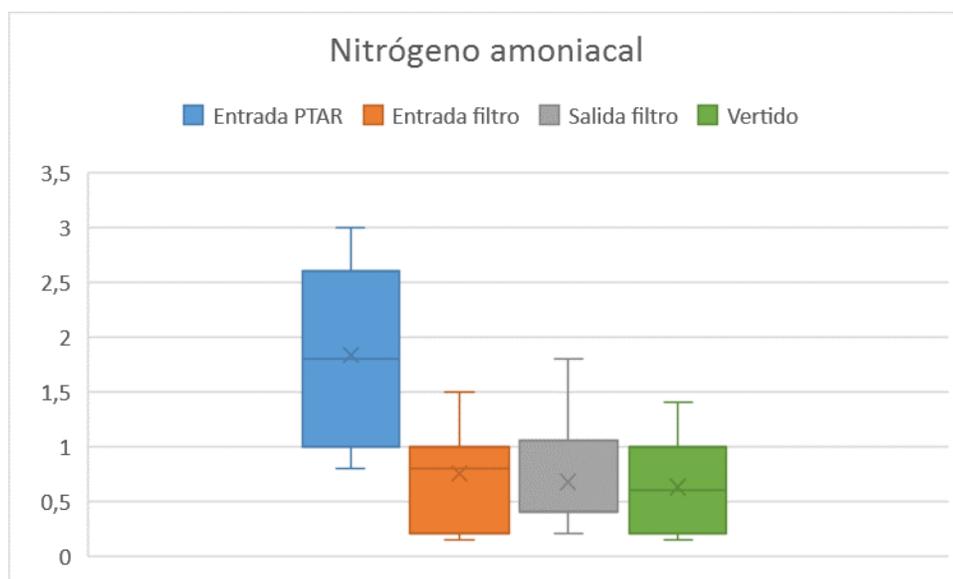


Figura 85. Gráfico de cajas de Nitrógeno amoniacal de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

### 5.3.2 Fósforo

Las altas concentraciones de fósforo consumen mayor cantidad de oxígeno disuelto, por lo tanto, es posible observar una relación estrecha entre el comportamiento del fósforo presente en el agua residual y el OD.

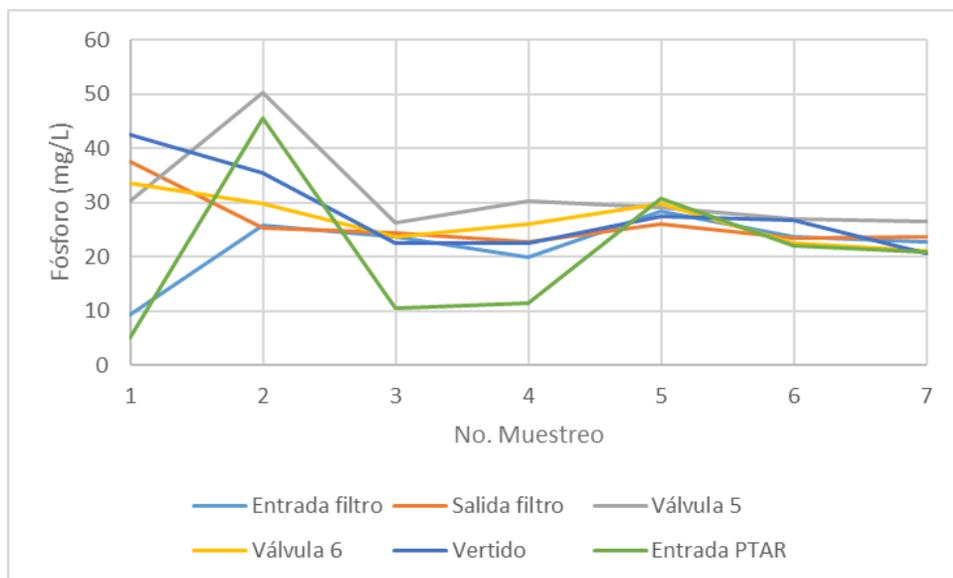


Figura 86. Gráfico de dispersión del fósforo en todos los puntos medidos.

En la Figura 87 se aprecia que los valores de entrada a la planta son los que presentan mayor variación, los más altos son los que se presentan en la válvula 5, seguidos por la válvula 6 y la entrada al filtro, esto debido a la ausencia de OD en el reactor UASB.

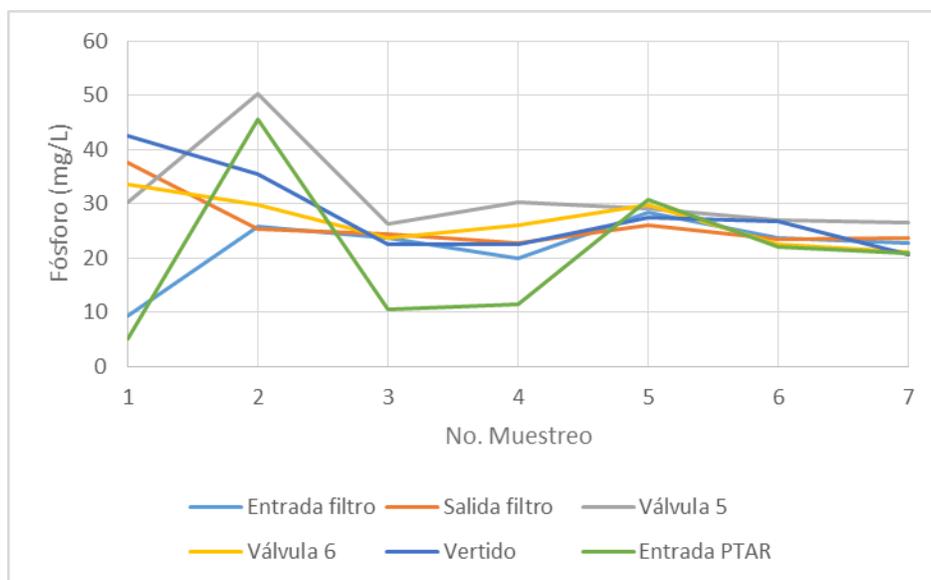


Figura 87. Gráfico de dispersión de fósforo de todos los puntos de muestreo.

Al igual que con el nitrógeno, el comportamiento del fósforo en la salida del filtro y en el vertido son muy similares, lo que indica que el sedimentador secundario no produce cambios significativos en el tratamiento de los nutrientes en el agua residual.

En la Figura 88 se puede ver que las mayores variaciones de datos se presentan en la entrada de la planta y las variaciones menores se encuentran a la salida del filtro, las concentraciones mayores de fósforo se midieron en el vertido.

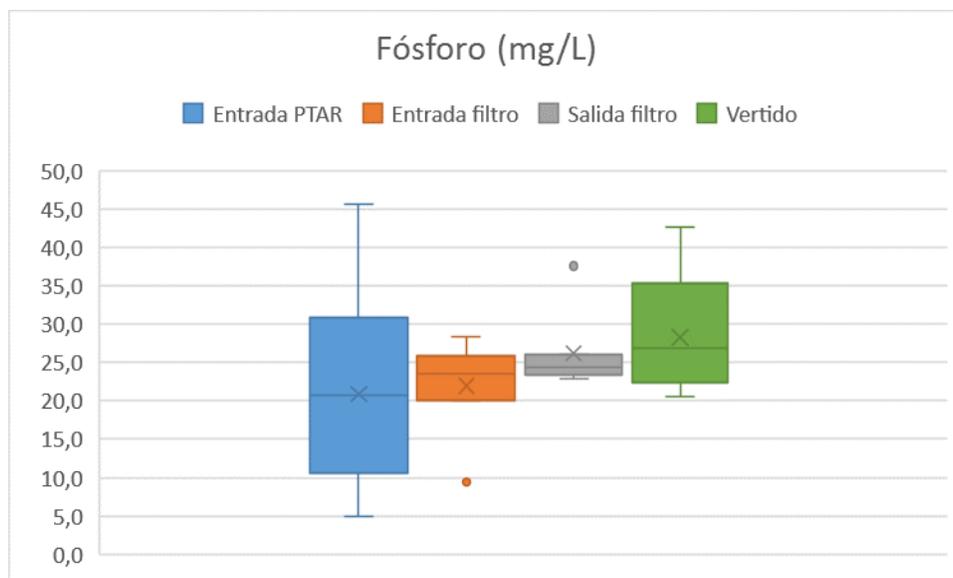


Figura 88. Gráfico de cajas de fósforo de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

Según los valores esperados para las aguas residuales urbanas se establecen rangos ubicados entre los valores de 3,2 a 3,6 por lo tanto, en la Figura 89 se establecen estos valores como puntos de comparación, se observa que la mayoría de los valores muestreados se encuentran dentro del rango estimado.

Se presenta una excepción en el punto de muestreo 2 y esto debido al aumento de la concentración de fósforo que se produjo en ese muestreo.

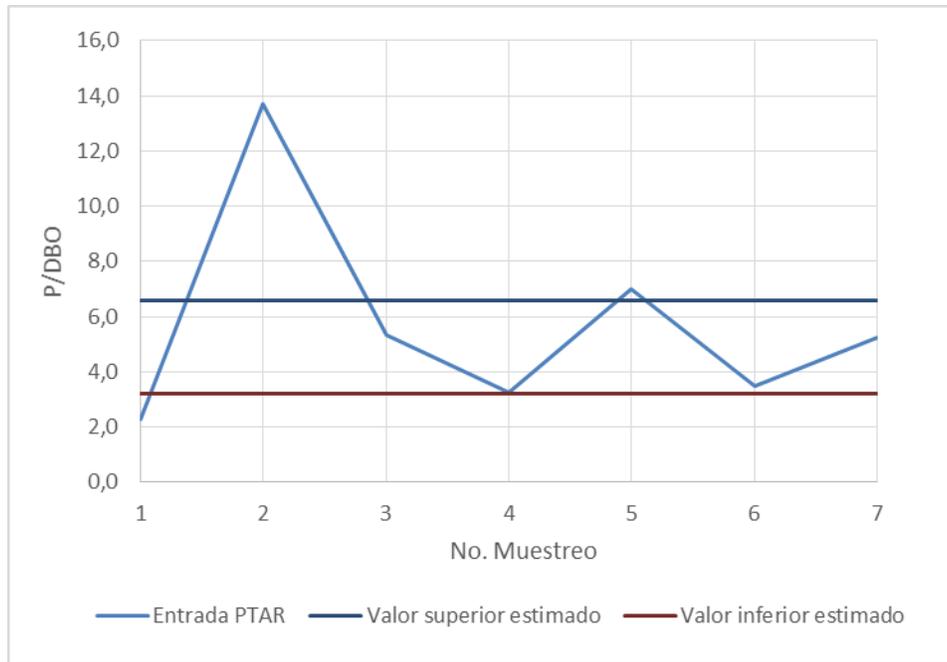


Figura 89. Gráfico de dispersión de la relación P/DBO en la entrada de la planta

Cuadro 30. Resumen de valores de los nutrientes presentes en el agua residual

| Parámetro<br>(mg/L)    | Entrada PTAR |      |       | Entrada Filtro |      |       | Salida Filtro |       |       | Válvula 5 |       |       | Válvula 6 |       |       | Vertido |       |       |
|------------------------|--------------|------|-------|----------------|------|-------|---------------|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|---------|-------|-------|
|                        | Máx          | Min  | Prom  | Máx            | Min  | Prom  | Máx           | Min   | Prom  | Máx       | Min   | Prom  | Máx       | Min   | Prom  | Máx     | Min   | Prom  |
| Nitrato                | 42,00        | 3,20 | 23,31 | 42,00          | 9,80 | 25,11 | 56,00         | 6,20  | 36,31 | 48,00     | 2,00  | 17,71 | 60,00     | 2,40  | 24,63 | 56,00   | 12,10 | 32,87 |
| Nitrito                | 0,32         | 0,12 | 0,21  | 0,80           | 0,01 | 0,26  | 11,00         | 1,40  | 4,65  | 0,20      | 0,04  | 0,11  | 0,20      | 0,02  | 0,10  | 9,55    | 1,12  | 3,26  |
| Nitrógeno<br>Amoniacal | 3,00         | 0,80 | 1,84  | 1,50           | 0,15 | 0,75  | 1,80          | 0,15  | 0,68  | 8,20      | 0,80  | 2,44  | 4,40      | 0,40  | 1,63  | 1,40    | 0,15  | 0,63  |
| Fósforo                | 45,60        | 5,00 | 20,89 | 28,40          | 9,40 | 21,94 | 37,60         | 22,80 | 26,20 | 50,40     | 26,20 | 31,40 | 33,60     | 21,00 | 26,63 | 42,60   | 20,60 | 28,26 |

### 5.3.3 Sólidos totales

Según se puede observar en la Figura 90 los valores de los sólidos totales en la entrada son muy variables y no hay un punto de medición en el cual se observe de manera constante una disminución con respecto al tratamiento de algún sistema en específico.

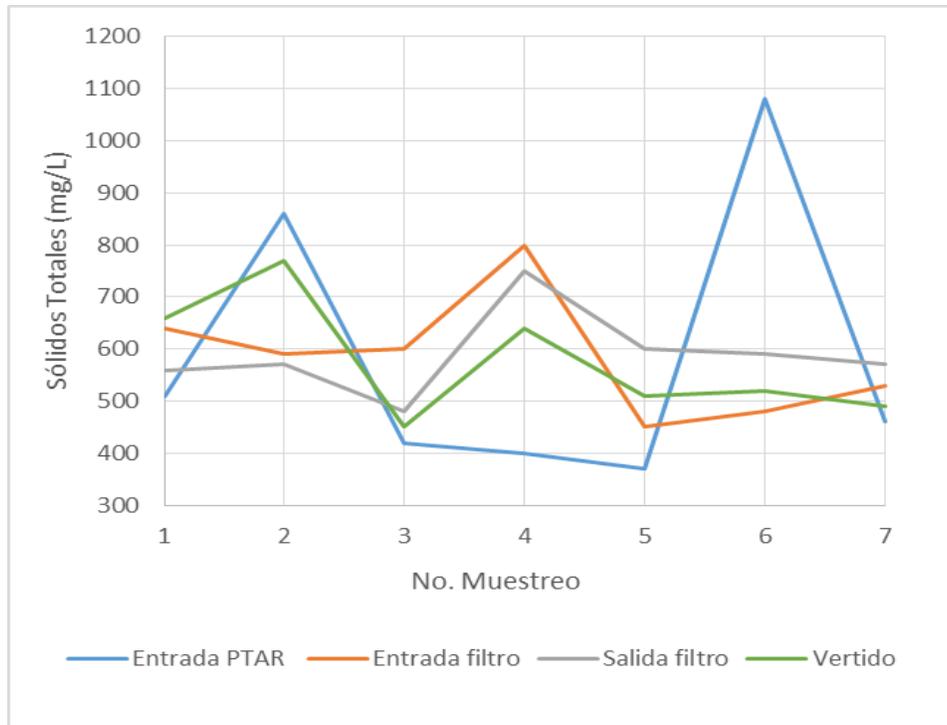


Figura 90. Gráfico de dispersión de sólidos totales, excepto las válvulas

Debido a que en la planta de tratamiento de Santa Cecilia los caudales de ingreso son muy bajos en los sistemas, sobretodo en el reactor UASB, para poder funcionar con el volumen mínimo, tiene que retener sólidos de largos periodos de tiempo, debido a que los TRH son muy altos, el agua al entrar al sistema tiene que ejercer una mayor fuerza, debido a que los lodos en la parte inferior tienden a densificarse después de mucho tiempo de estar dentro del sistema. También, la presencia de sólidos a la salida del reactor puede deberse a la ineficiencia de las canoas de salida del agua residual, debido a que no presenta flujo laminar a la salida del mismo.

Si se observan los valores del vertido y de la salida del filtro, se puede apreciar una nivelación en los valores obtenidos desde el quinto muestreo, esto puede deberse a que para el segundo muestreo en el filtro percolador se cambió la primera capa del material de soporte por esponjas DHS, y para el correcto funcionamiento de las mismas se debe dar un tiempo de adaptación del material.

En la Figura 91 se puede observar que el valor en la entrada de la planta obtenido por AyA se encuentra entre el rango de los valores medidos en la fase experimental, al igual que en el caso del vertido que se encuentra sobre la línea de tendencia.

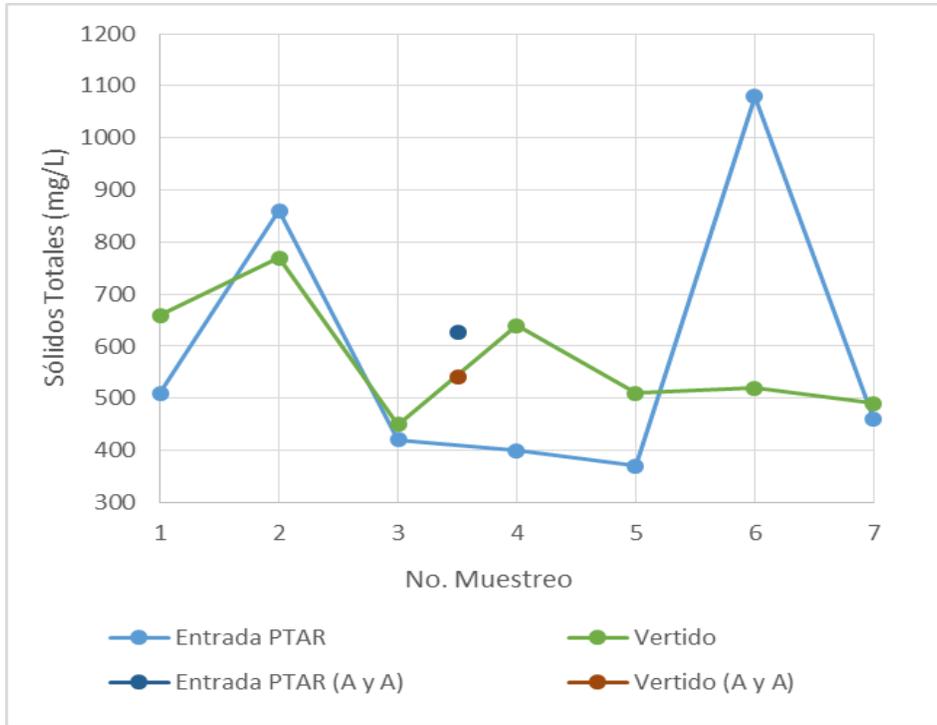


Figura 91. Gráfico de dispersión de sólidos totales en la entrada y vertido de la planta

En la Figura 92 se puede apreciar que los valores de ST en la válvula 5 exceden en gran medida la del resto de las mediciones, esto debido a que por ser lodos, la concentración de sólidos es mucho mayor.

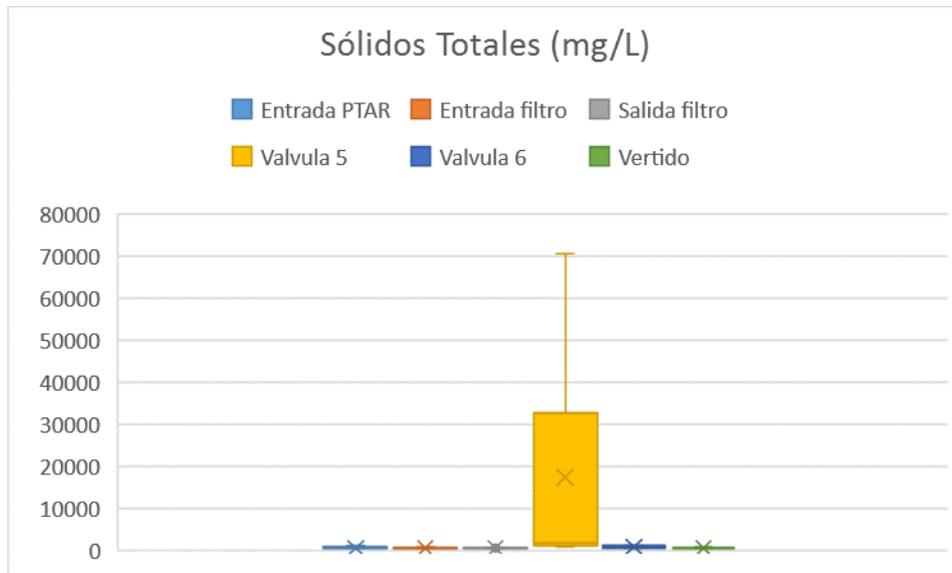


Figura 92. Gráfico de cajas de sólidos totales de todos los puntos de muestreo

En la Figura 93 se descartaron los valores de las válvulas para poder apreciar mejor la diferencia entre los puntos de muestreo, como es de esperar, la mayor concentración de sólidos totales se localiza en la entrada de la planta y también la mayor variabilidad de los datos, esto debido a que las cargas del afluente varían con respecto al uso; y las concentraciones menores se localizan en la salida del filtro y el vertido, siendo la salida del filtro la que presenta menor variabilidad entre los muestreos.

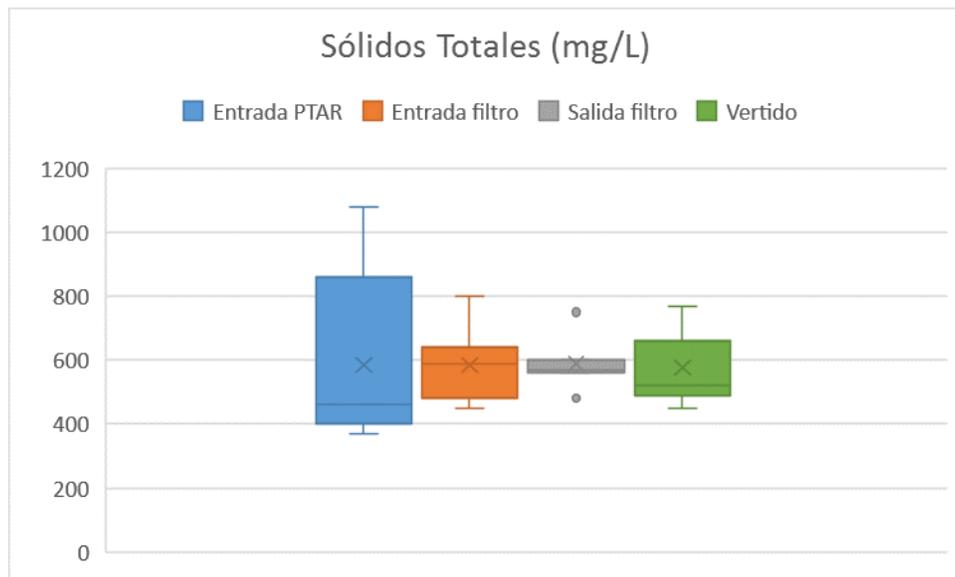


Figura 93. Gráfico de cajas de sólidos totales de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

### 5.3.4 Sólidos volátiles

Se puede observar en la Figura 94 que los valores de los sólidos volátiles a la salida del filtro presentan comportamientos similares a los valores en el vertido, los valores a la entrada de la planta varían considerablemente entre muestreos, pero los valores se van homogeneizando en los siguientes procesos de tratamiento. La alta presencia de sólidos volátiles indica que se requieren de sistemas de tratamiento más enfocados en eliminar estos sólidos, que están relacionados con la materia orgánica presente en el agua.

Además, al igual que en los sólidos totales, a partir del quinto muestreo se observa una estabilización de los datos medidos a la salida del filtro.

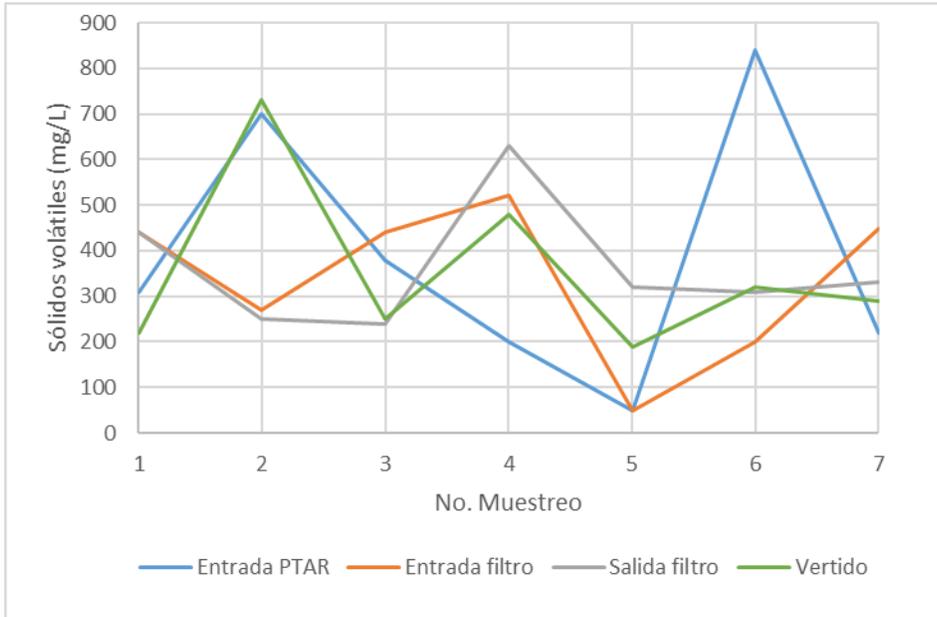


Figura 94. Gráfico de dispersión de los sólidos volátiles, excluyendo las válvulas  
 En la Figura 95 se puede apreciar como la válvula 5, por tener un mayor contenido de sólidos totales, proporcionalmente presenta un mayor contenido de sólidos volátiles, ya que la cantidad de biomasa presente es mayor en los lodos.

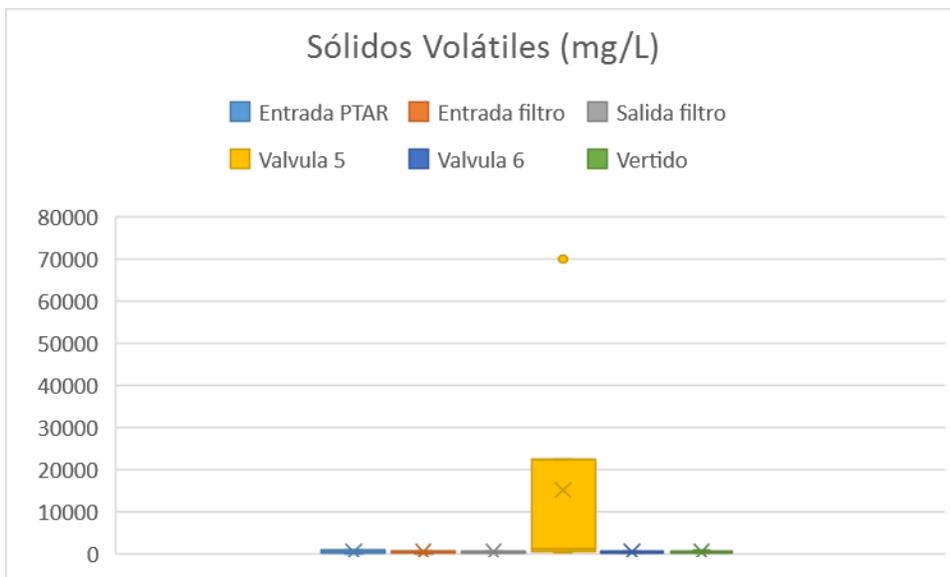


Figura 95. Gráfico de cajas de sólidos volátiles de todos los puntos de muestreo

En la Figura 96 se aprecia una relación relativamente similar de concentraciones con respecto a los sólidos totales.

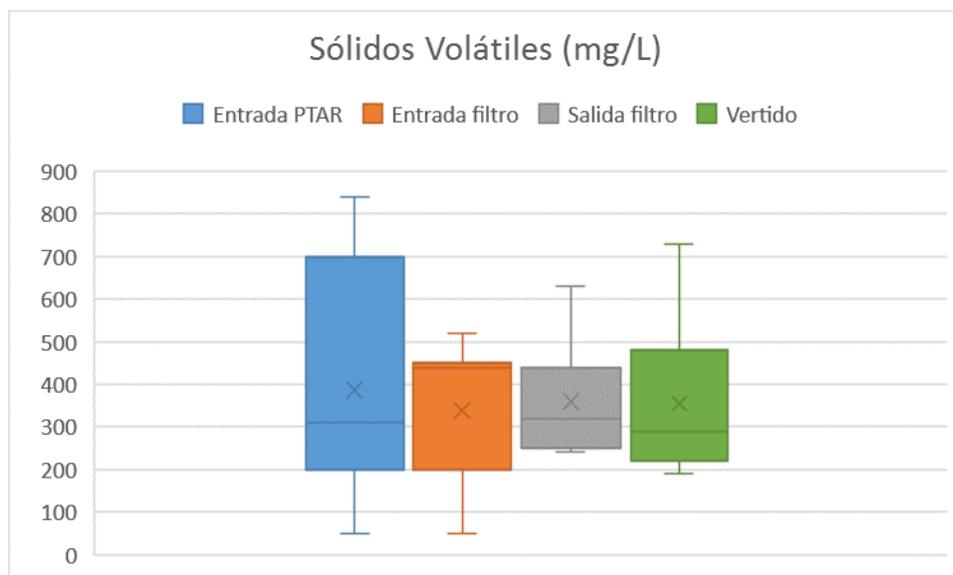


Figura 96. Gráfico de cajas de sólidos volátiles de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

### 5.3.5 Sólidos suspendidos totales

En la Figura 97 se puede observar que los valores de los sólidos suspendidos totales no presentan cambios significativos a la salida del filtro, ya que estos representan los sólidos no filtrables; mientras que la reducción de los valores a la entrada de la planta en comparación con la salida del reactor UASB, sí presenta valores de reducción más significativos, especialmente en los casos donde las concentraciones en la entrada de la planta son mayores.

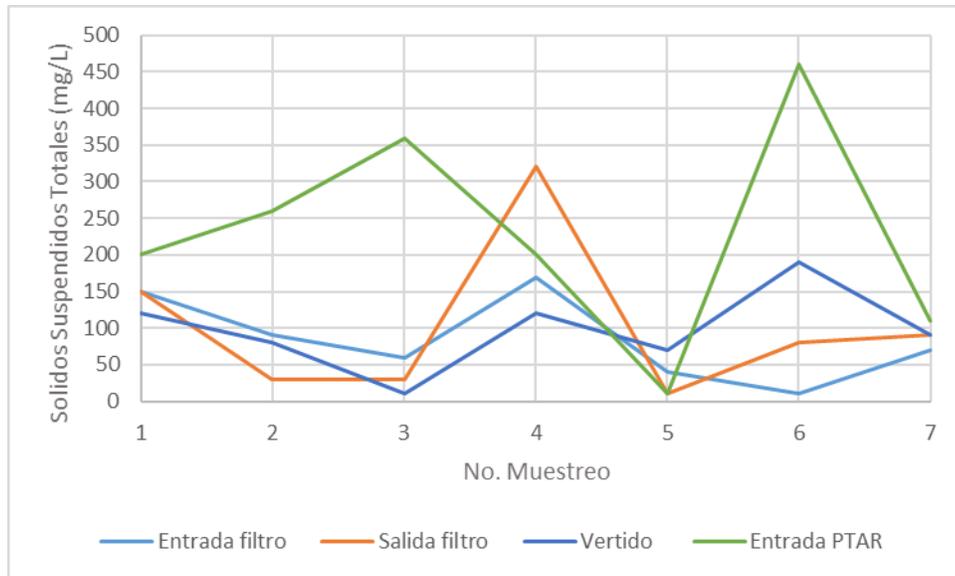


Figura 97. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales, excluyendo las válvulas

En la Figura 98 se puede observar que de los muestreos tomados, únicamente en una ocasión los valores cumplieron con el límite permitido por el reglamento, con respecto a los datos suministrados por A y A quedaron sobre la línea de tendencia entre los muestreos adyacentes, superando el valor límite.

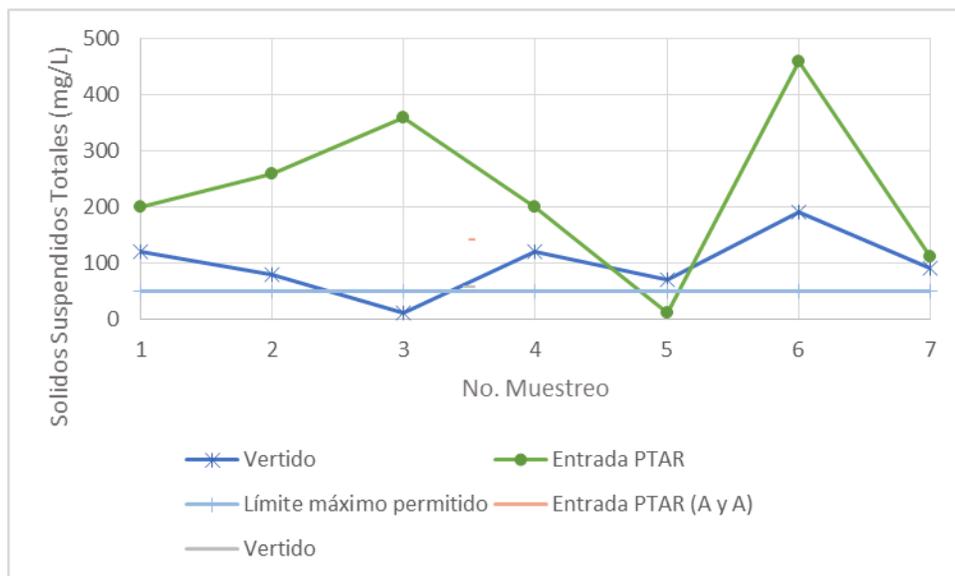


Figura 98. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento

En la Figura 99 se puede ver que la mayor concentración de SST se localiza en la válvula 5, que tiene una relación directa con la concentración de sólidos totales presentes en la misma.

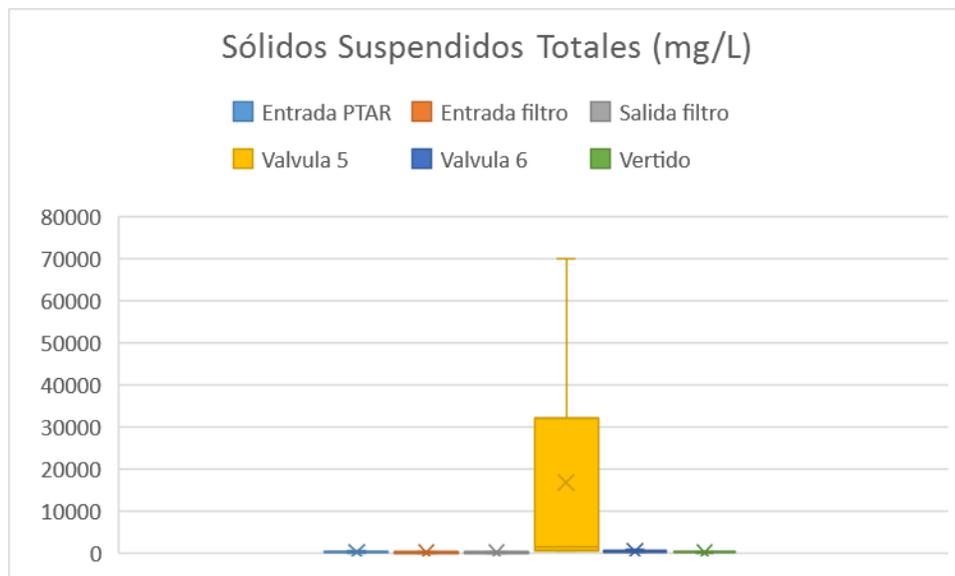


Figura 99. Gráfico de cajas de sólidos suspendidos totales en todos los puntos de muestreo

En la Figura 100 se puede observar que en la entrada de la planta se presentan las mayores concentraciones de SST y, además, la mayor variabilidad entre los datos medidos, por la misma razón que ocurre con los ST, con respecto al vertido, los valores superan los obtenidos a la entrada del filtro y la mediana del vertido supera la mediana de la salida del filtro, lo que implica que la mitad de los muestreos dieron valores más altos para el vertido que en la salida del filtro a pesar de que el valor más alto de la salida del filtro supera el del vertido.

Las concentraciones de SST son menores a la entrada que a la salida del filtro y que en el vertido, lo que indica que el agua residual está obteniendo SST de fuentes externas.

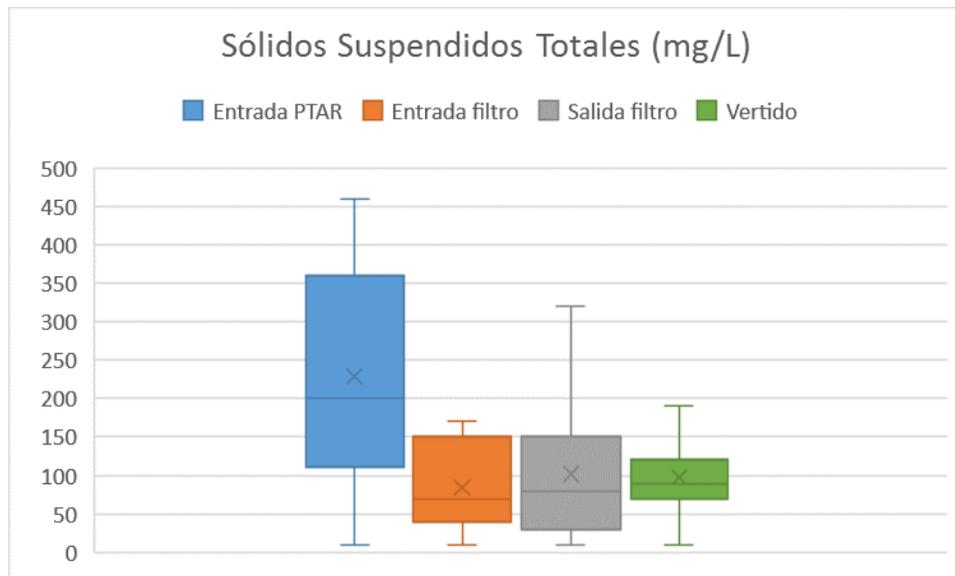


Figura 100. Gráfico de cajas de sólidos suspendidos totales de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

### 5.3.6 Sólidos suspendidos sedimentables

En la Figura 101 y Figura 102 se pueden apreciar las distribuciones de los sólidos sedimentables, como es de esperar los valores más altos se encuentran en las válvulas y, además, se ve una disminución significativa de la concentración de los sólidos en los últimos dos muestreos.

Para la entrada del filtro y en el vertido no se presentó en ninguno de los muestreos, sólidos sedimentables visibles, en el caso de la salida del filtro en los primeros muestreos se presentaron variaciones y desde el muestreo cuatro, se eliminan los sólidos sedimentables, esto, al igual que en los sólidos totales puede deberse a la estabilización de las esponjas como material de soporte.

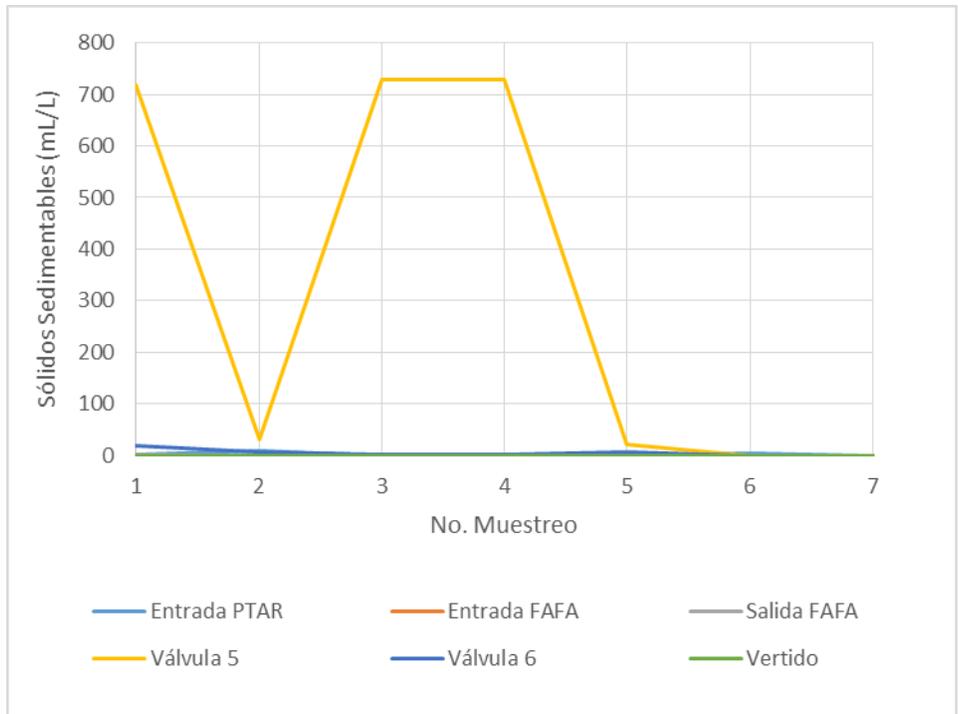


Figura 101. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables en todos los puntos de muestreo

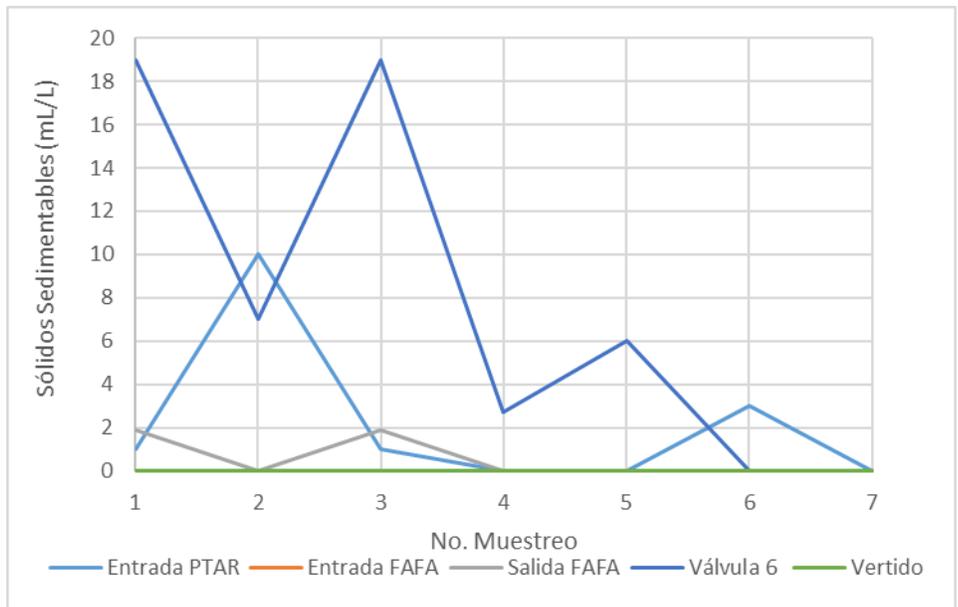


Figura 102. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables, excepto la válvula 5

En la Figura 103 se pueden apreciar los valores de entrada y vertido en la planta en comparación con los obtenidos por el AyA, ambos cumplen a la salida de la planta con el límite establecido en el Reglamento, con respecto a la entrada de la planta el valor de AyA se encuentra entre el rango de mediciones en la fase experimental.

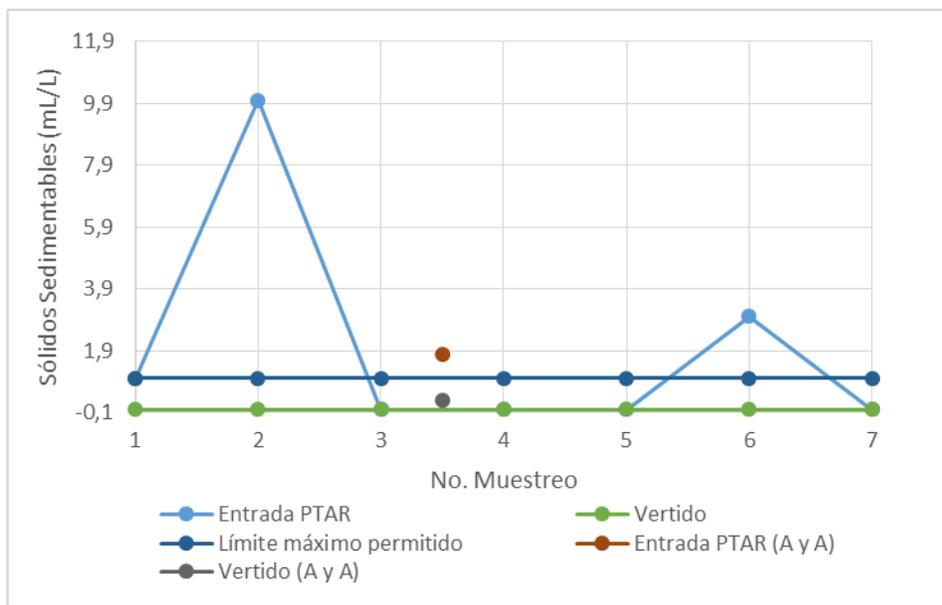


Figura 103. Gráfico de dispersión de los sólidos sedimentables en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento

Como se puede apreciar en la Figura 104, la mayor concentración de SSED se encuentra en la válvula 5, seguida de la válvula 6 con una amplia diferencia entre estas, dicho comportamiento se debe a la localización de las válvulas debido a que la válvula 5 extrae lodos de una zona inferior a la válvula 6, y por ende, la densidad de los mismos es mayor entre más profundo se localicen.

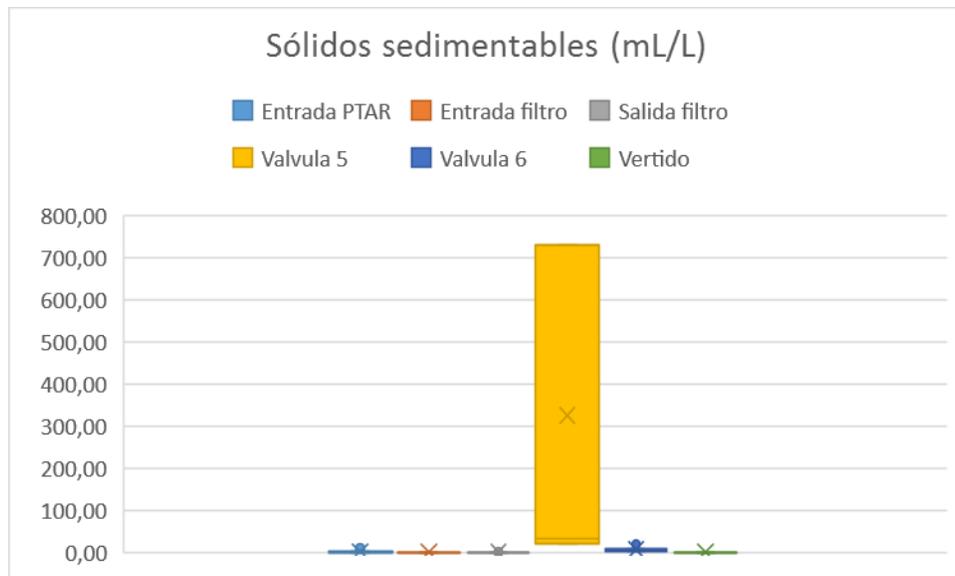


Figura 104. Gráfico de cajas de sólidos sedimentables de todos los puntos de muestreo

En la Figura 105 se puede ver como las concentraciones de sólidos sedimentables mayores se localizan a la entrada de planta, en la caja de rejillas (sin tomar en cuenta los valores obtenidos en las válvulas) y esto debido a que el agua residual no ha pasado ningún proceso de separación del líquido de los sólidos sedimentables.

Debido a la baja concentración de sólidos sedimentables es apreciable que los sistemas poseen dimensiones adecuadas para permitir la sedimentación de los sólidos de mayor tamaño, para el caso del vertido no se presentó sedimentación apreciable.

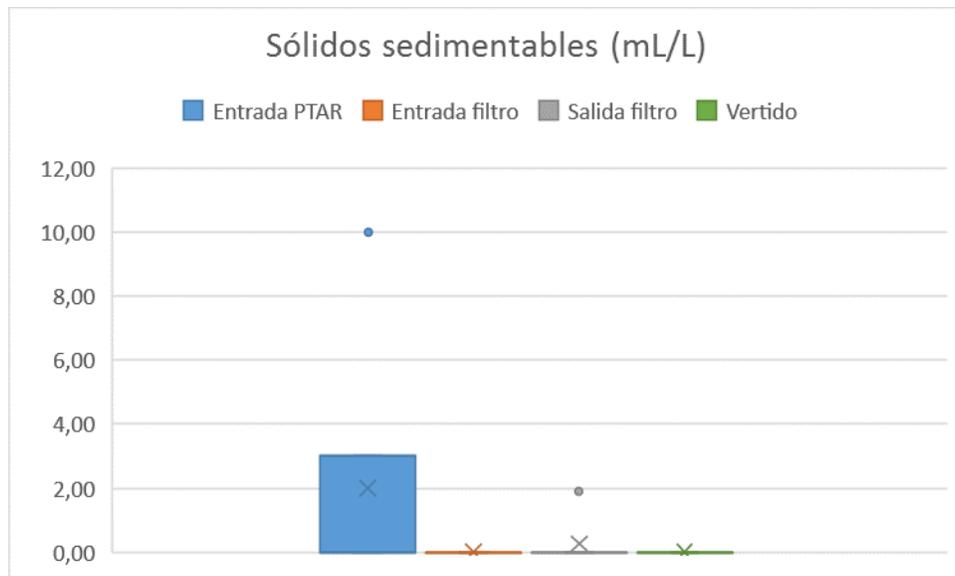


Figura 105. Gráfico de cajas de sólidos sedimentables de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

La velocidad de sedimentación es un parámetro importante al momento de decidir los sistemas de tratamiento primario en una planta de tratamiento, esto debido a que las dimensiones deben tomar en cuenta cuánto tiempo debe estar un sólido en el sistema hasta lograr sedimentarse y prevenir la resuspensión del mismo. En la Figura 106 se aprecia que las velocidades de sedimentación más variables se presentan en la entrada de la planta, y esto se debe a que en este punto no se ha dejado sedimentar el agua residual, por lo que trae tanto partículas muy densas de fácil precipitación como partículas en suspensión.

En la entrada al filtro no se presentan sustancias sedimentables visibles debido a que el TRH en el reactor UASB es muy alto, y eso provoca que la mayoría de los sólidos sedimentables se queden en el sistema como lodos.

A la salida del filtro se presentan algunos sólidos con velocidades de sedimentación bajas, en los casos en los que se presentaron, y esto debido a que los sólidos de mayor tamaño no suelen llegar al filtro.

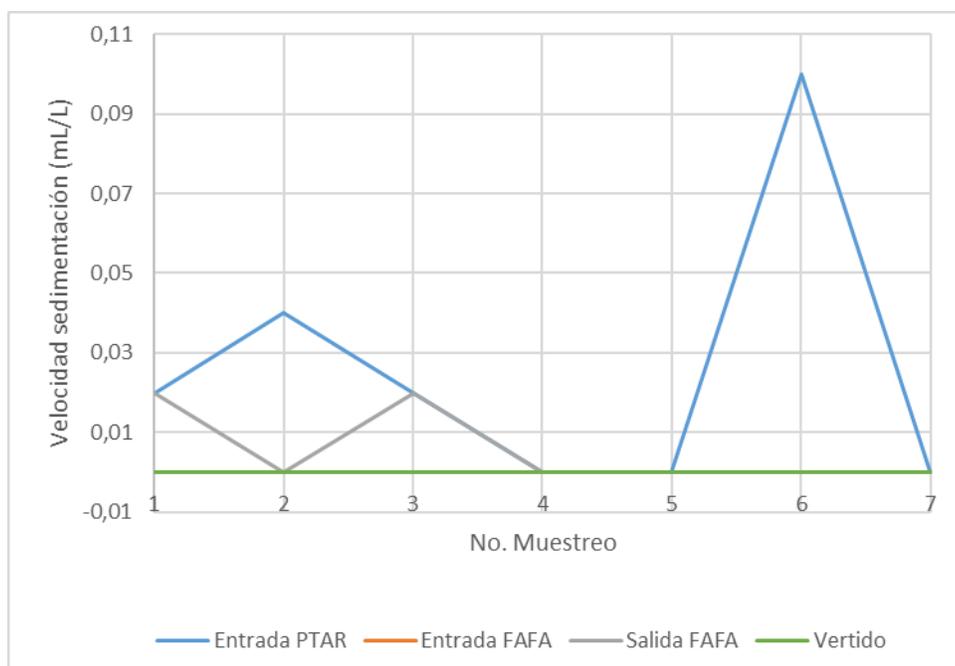


Figura 106. Gráfico de dispersión de la velocidad de sedimentación, excepto válvulas

Cuadro 31. Resumen de valores de los sólidos presentes en el agua residual

| Parámetro(mg/L)       | Entrada PTAR |      |      | Entrada Filtro |      |      | Salida Filtro |      |       | Válvula 5 |      |       | Válvula 6 |      |      | Vertido |      |       |
|-----------------------|--------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|-------|-----------|------|-------|-----------|------|------|---------|------|-------|
|                       | Máx          | Min  | Prom | Máx            | Min  | Prom | Máx           | Min  | Prom  | Máx       | Min  | Prom  | Máx       | Min  | Prom | Máx     | Min  | Prom  |
| Sólidos Totales       | 1080         | 370  | 586  | 800            | 450  | 584  | 750           | 480  | 589   | 70690     | 870  | 17316 | 1210      | 490  | 771  | 770     | 450  | 577,1 |
| Sólidos Volátiles     | 840          | 50,0 | 386  | 520            | 50,0 | 339  | 630           | 240  | 360   | 69970     | 150  | 15104 | 650       | 90   | 389  | 730     | 190  | 354,3 |
| Sólidos Sedimentables | 10,0         | 0,00 | 2,00 | 0,00           | 0,00 | 0,00 | 1,90          | 0,00 | 0,271 | 730       | 19,3 | 325   | 19,0      | 2,30 | 6,41 | 0,00    | 0,00 | 0,00  |
| Sólidos susp. totales | 460          | 10,0 | 229  | 170            | 10,0 | 84,3 | 320           | 10,0 | 101   | 70040     | 370  | 16836 | 920       | 140  | 396  | 190     | 10,0 | 97,14 |

### 5.3.7 Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

En los muestreos realizados se puede apreciar en la Figura 107 que los puntos con más DQO se presentan en las válvulas y en la entrada de la planta; debido a que los valores en las válvulas no son tan significativos para el análisis de funcionamiento de los sistemas de la planta, se separan los puntos de muestreo en la Figura 108, donde se esperarían los valores más bajos en el vertido; pero estos valores varían, siendo en algunos casos los valores a la salida del filtro inferiores a los del vertido.

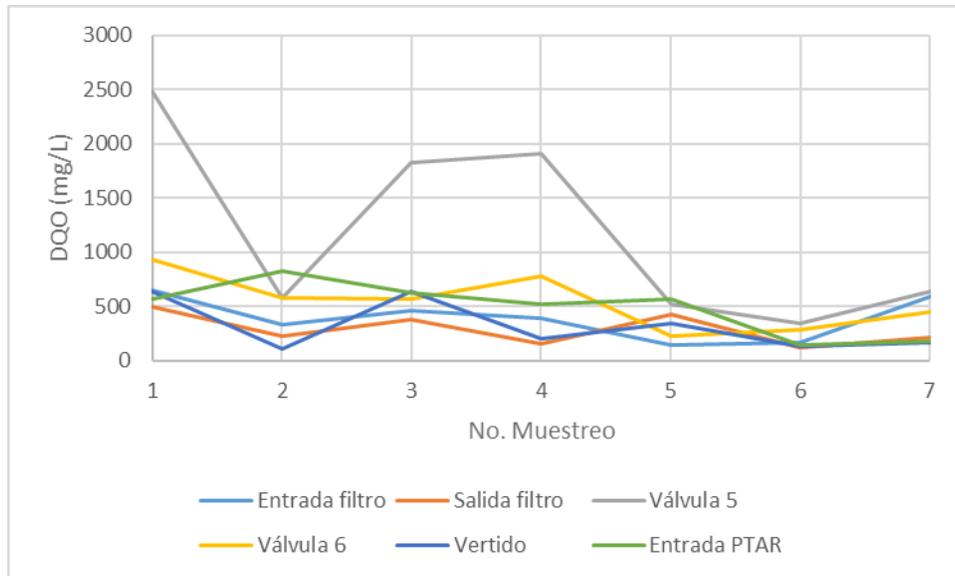


Figura 107. Gráfico de dispersión de DQO en todos los puntos de muestreo

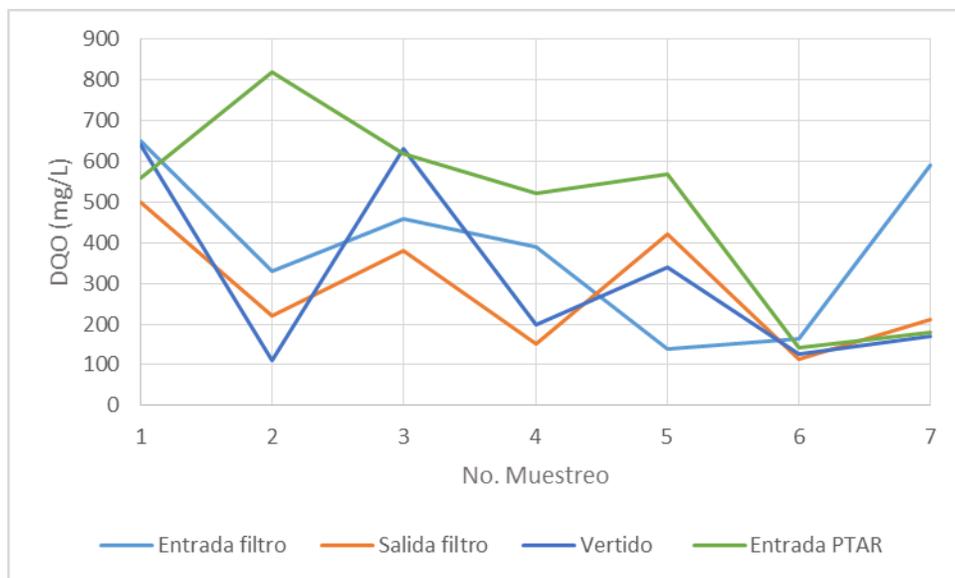


Figura 108. Gráfico de dispersión de DQO en los puntos de muestreo, excepto las válvulas

Se puede apreciar en la Figura 109 que de los muestreos realizados, únicamente cumplen con los límites establecidos en el reglamento en dos ocasiones y agregando el valor obtenido del Laboratorio Nacional de Aguas, tomado el 16 de abril del 2019, el cual también cumple.

En el reactor UASB sí presenta un efecto de remoción de DQO en el sistema, ya que en la mayoría de los muestreos el valor a la salida del reactor es comparativamente menor al de la entrada al mismo.

En cuanto al filtro percolador, también se aprecia una disminución de los valores de DQO a la salida de cada sistema; pero a pesar de esto la eficiencia de remoción es muy baja según los valores de diseño esperados.

Si se observan los valores de eficiencia de remoción del DQO en cada uno de los sistemas, se aprecia que es inferior a lo esperado según los valores teóricos obtenidos, y según los valores de eficiencia que presentan en el Cuadro 13.

Si se observan las características de diseño, se puede apreciar que la planta cumple con dimensiones de diseño; pero en el caso de la velocidad de flujo ascendente, presenta valores inferiores a los esperados lo que provoca una disminución en la tasa de colisión entre las partículas del manto de lodo, lo que puede afectar la eficiencia de remoción. Además, se presenta una falla de diseño a la salida del agua, la cual no ingresa a las canoas con flujo laminar, debido a que se fuga por los extremos que no se encuentran correctamente sellados y pasa a la tubería que lleva al filtro percolador.

Los valores de entrada de del agua residual oscilan alrededor de los 100 a 800 mg/L, y se espera que sean menores a los 1000 mg/L, lo que indica que las fuentes contaminantes si corresponden a las esperadas.

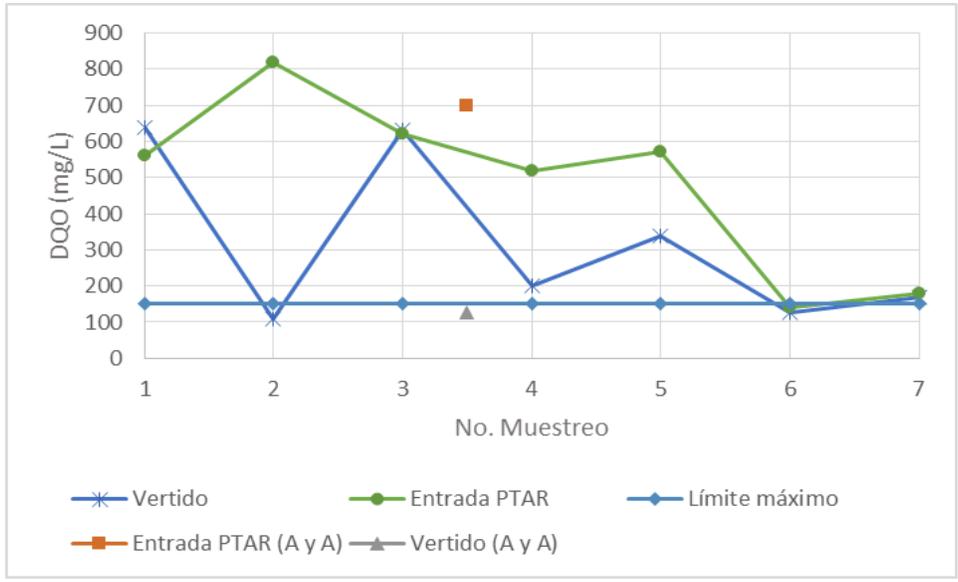


Figura 109. Gráfico de dispersión de la demanda química de oxígeno en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento

En la Figura 110 el valor de la mediana de los datos disminuye conforme pasa por los diferentes sistemas, lo que implica que en el vertido la mitad de los muestreos dieron valores inferiores a 200 mg/L, mientras que en la entrada a la planta la mitad de los muestreos dieron valores inferiores a 560 mg/L, por lo tanto, se puede inferir que sí se logra una reducción de DQO conforme pasa por la planta de tratamiento.

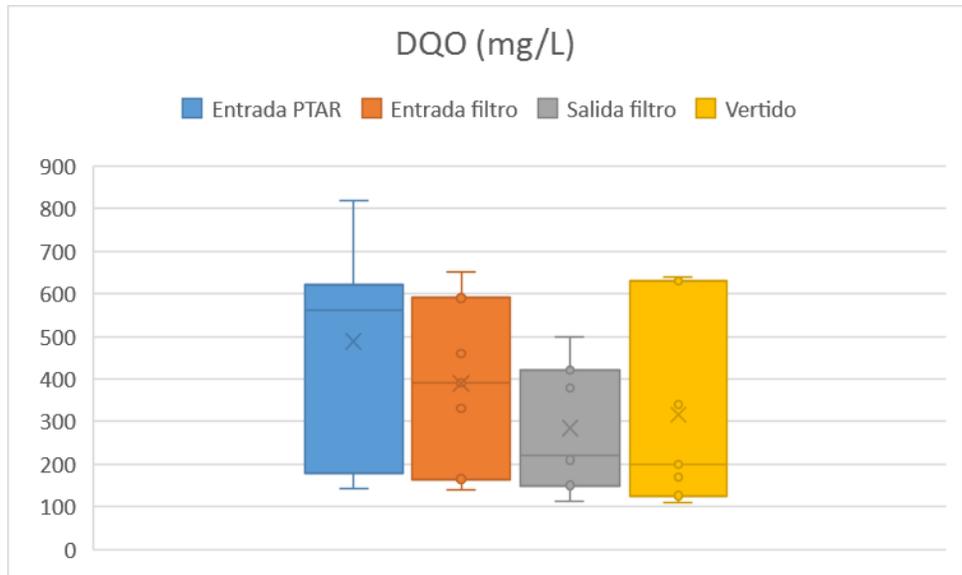


Figura 110. Gráfico de cajas de DQO de los puntos de muestreo, excepto las válvulas.

En la Figura 111 se pueden apreciar los valores de DBO en cada punto de muestreo, los valores más altos se presentan entre la válvula 5 y la entrada a la planta, al salir del reactor UASB se presenta una alta remoción de DBO ya que los valores disminuyen de forma considerable.

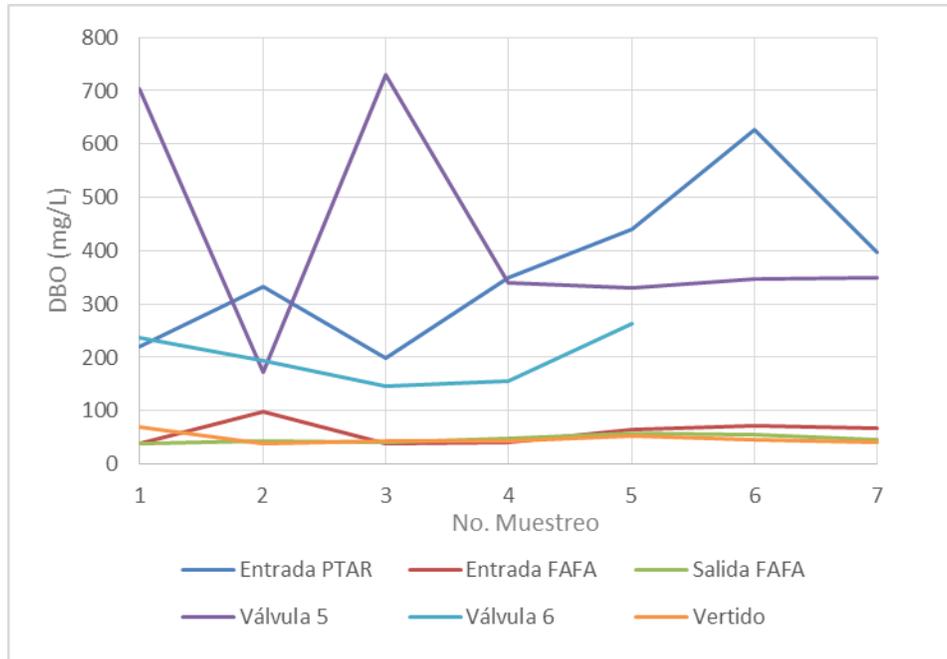


Figura 111. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en todos los puntos de muestreo

Debido a que los valores de las válvulas y la entrada de la planta presentan altas variaciones con el resto de los puntos, para poder observar mejor el comportamiento en el resto de los puntos de muestreo, se eliminan estos datos, como se observa en la Figura 112, en general los valores más altos se presentan en la entrada del filtro y los más bajos en el vertido de la planta, que es el comportamiento de remoción esperado.

En los casos en que este comportamiento se altera en el filtro puede estar relacionado al desprendimiento de biomasa atrapada en el material de soporte, mientras que en el reactor UASB puede deberse al punto donde se realiza el muestreo, ya que el oxígeno disuelto presente en el agua varía, por tanto, la carga biológica consume oxígeno durante la salida del reactor, razón por la cual es posible observar que estos valores varían más entre muestreos, que el resto de los puntos de medición.

Es de esperar que en condiciones aerobias como a la salida del filtro y en el vertido se presenten las condiciones más bajas de DBO debido a la presencia de oxígeno que permiten la estabilización de la materia orgánica presente en el agua por medio de la oxidación.

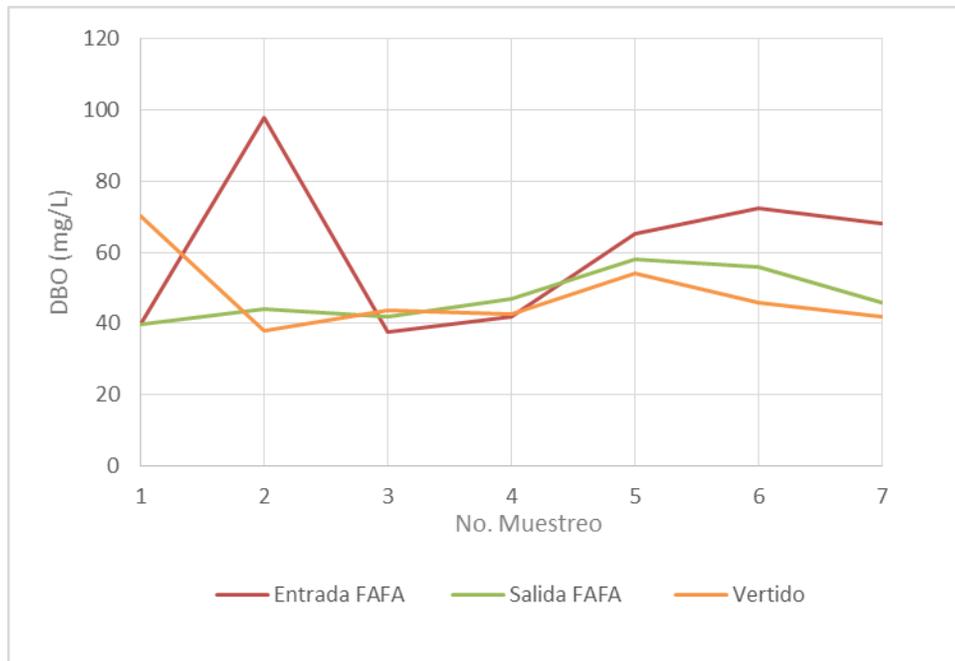


Figura 112. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en los puntos de muestreo, excepto válvulas y valor de entrada PTAR

En la Figura 113 se observa la comparación de los puntos medidos en la fase experimental con respecto a los medidos por A y A, no se observan variaciones importantes entre las medidas, para una mejor apreciación del cumplimiento de los límites establecidos en el reglamento se dejan en la Figura 114 únicamente los valores en el vertido, comparados con el valor límite. Se puede ver que la mayoría de los valores obtenidos cumplen con el reglamento, así como el valor obtenido por el Laboratorio Nacional de Aguas.

Los valores de entrada de del agua residual oscilan alrededor de los 225 a 625 mg/L, y se espera que sean menores a los 400 mg/L, lo que indica presencia de contaminantes de origen biológico en algunos casos mayores a los esperados, por lo que se requiere encontrar la fuente de los mismos.

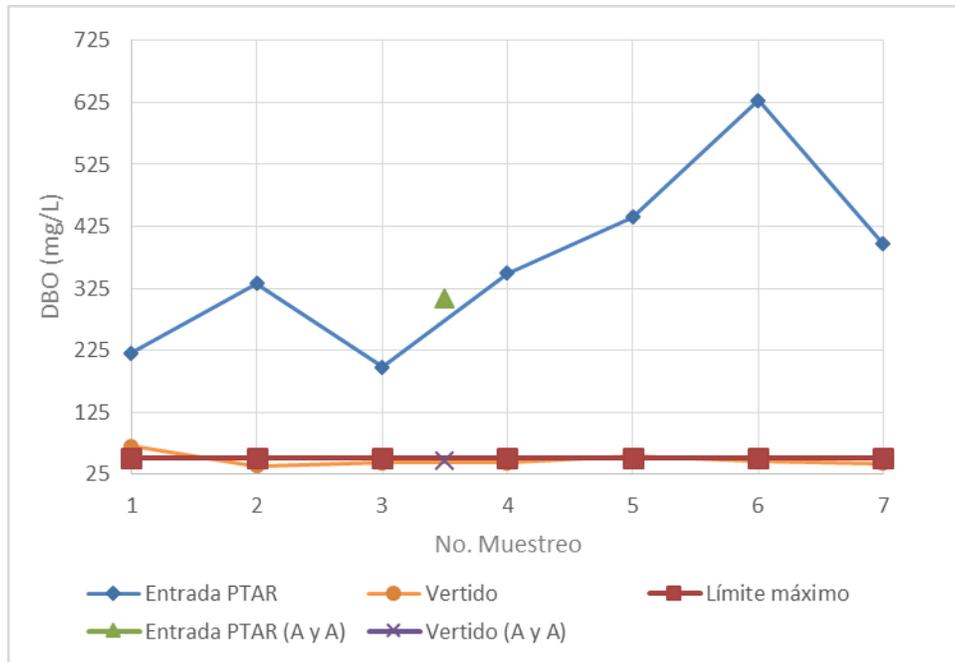


Figura 113. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en la entrada y vertido de la planta y valor límite según reglamento

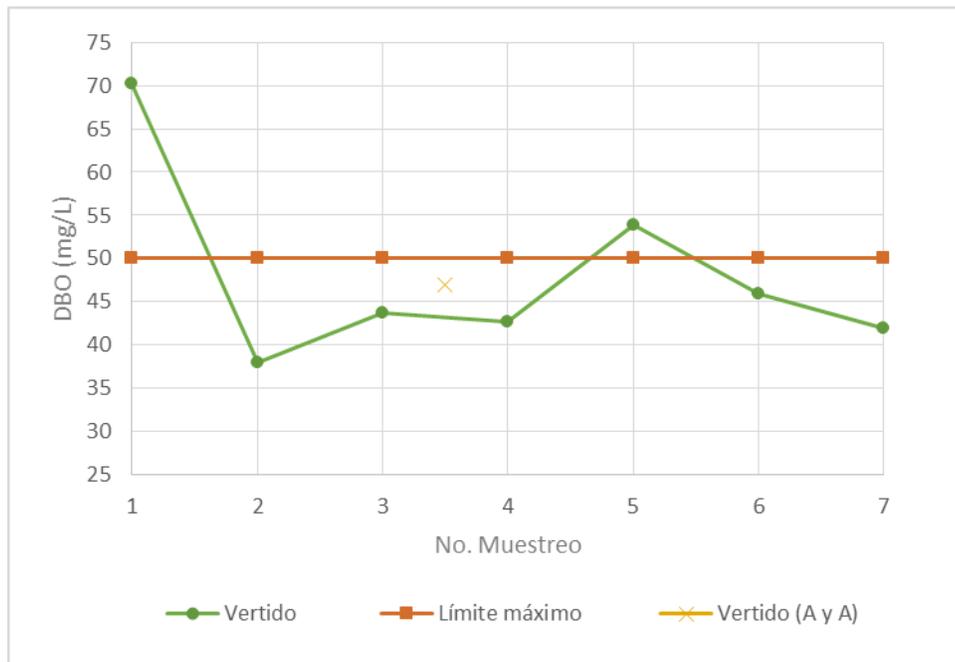


Figura 114. Gráfico de dispersión de la demanda bioquímica de oxígeno en el vertido de la planta y valor límite según reglamento

En la Figura 115, se aprecia que los valores más altos se presentan en la válvula 5; pero el valor de la mediana se ubica en un valor similar al obtenido para la entrada de la planta, lo que implica mayor variabilidad de los datos entre el segundo y tercer cuartil de la válvula, esto puede deberse a que al momento de la toma de muestras, se obtenían los lodos apenas se abría la válvula, sin dejar correr el agua hasta obtener una consistencia constante en el lodo, y en algunas mediciones este venía con mayor densidad y en otras los lodos se presentaban más diluidos.

Para el caso de la entrada de la planta, los valores presentan menor variabilidad, ya que el valor de la mediana se ubica cerca del promedio, además la amplitud de los datos es menor que en la válvula 5, excepto por un valor extremo que se presenta como el valor máximo obtenido.

Con respecto a la válvula 6, se aprecian variabilidades aún menores, ya que el rango de datos comprendido es menor que en el caso de entrada de la PTAR y la válvula 5, esto puede ser ocasionado debido a las bajas velocidades de ascenso, que no se presentan muchas alteraciones a la composición biológica del agua a la altura de muestreo.

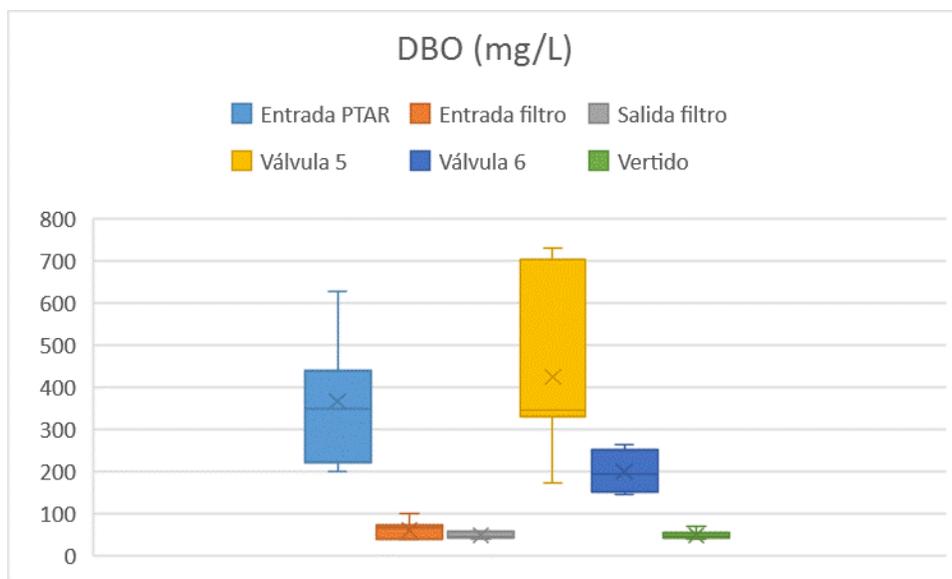


Figura 115. Gráfico de cajas de DBO en todos los puntos de muestreo

En la Figura 116 se aprecia que las variaciones entre los valores de la salida del filtro y el vertido mantienen concentraciones muy similares, mientras que si se aprecia una reducción de los valores de DBO después de pasar por el filtro, este cambio no es tan notorio como la reducción producto del reactor, estos valores se pueden apreciar mejor comparando los valores de eficiencia de remoción del Cuadro 36.

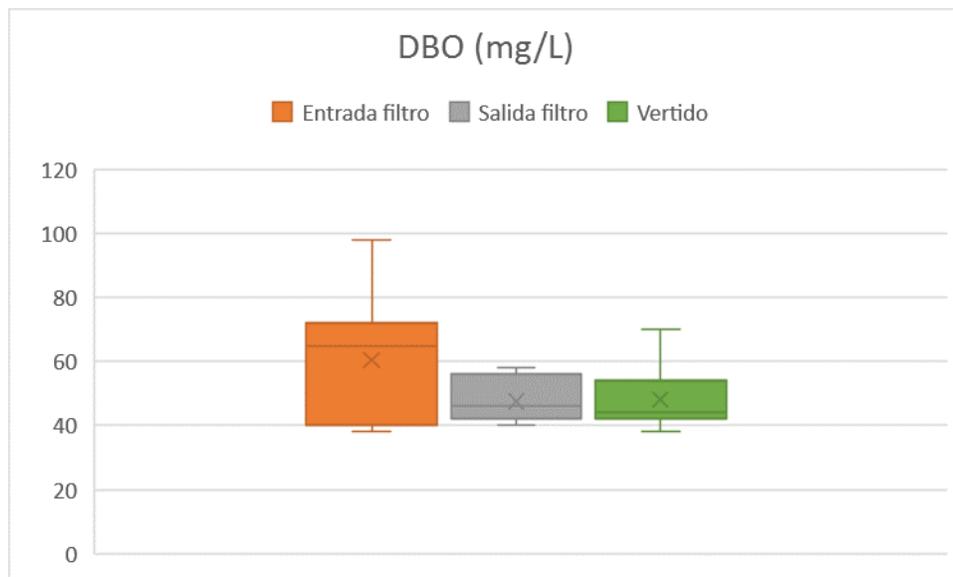


Figura 116. Gráfico de cajas de DBO de los puntos de muestreo con las concentraciones menores

Para poder establecer el tipo de contaminantes presentes en agua residual, se realiza la comparación DBO/DQO, se puede apreciar en la Figura 117 que en la entrada de la planta y las válvulas la relación de los valores es mayor. El valor de la entrada en el muestreo 6 es mucho mayor al resto de las mediciones, por lo que no se va a usar como un parámetro de análisis.

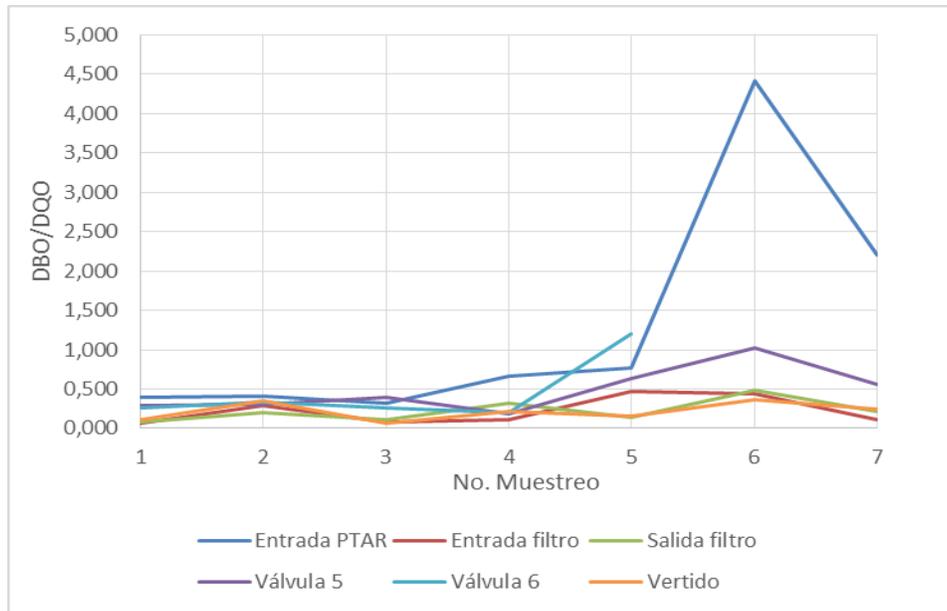


Figura 117. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO

Para una mejor apreciación del tipo de contaminantes presentes en el agua residual, se eliminan los valores extremos, como es el caso de la entrada a la planta y las válvulas; a partir de los datos que se pueden observar en la Figura 118 que los valores varían entre los rangos establecidos, por lo que no se le puede adjudicar un único tipo de contaminante, en los muestreos 3, 4 y 5 se presentan características de material poco biodegradable, mientras que en los otros muestreos se encuentran entre biodegradables y muy biodegradables.

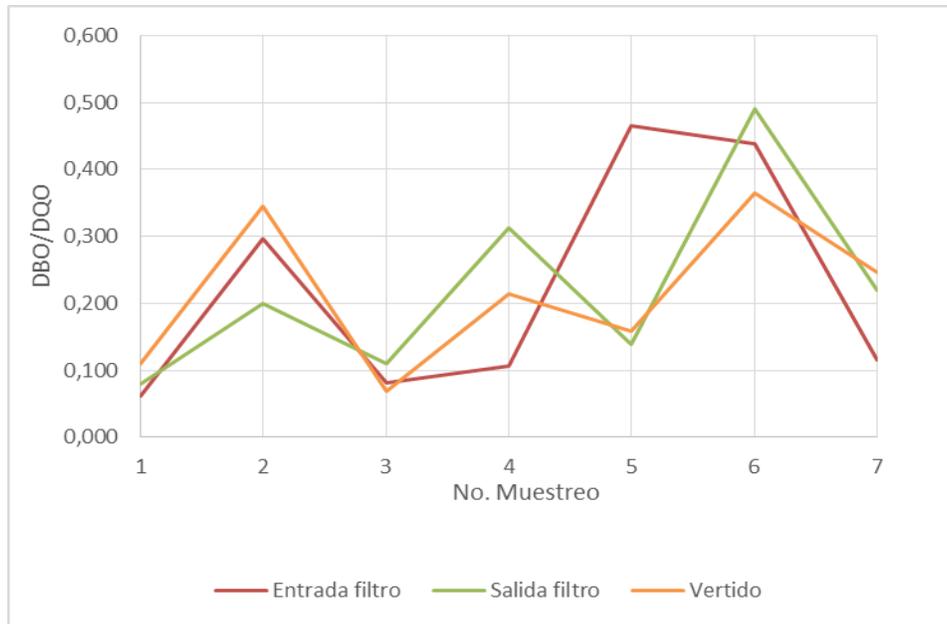


Figura 118. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO, excepto la entrada PTAR y válvulas

Cuadro 32. Resumen de valores de DBO, DQO y relación DBO/DQO presentes en el agua residual

| Parámetro(mg/L) | Entrada PTAR |      |      | Entrada Filtro |      |      | Salida Filtro |      |      | Válvula 5 |      |      | Válvula 6 |      |      | Vertido |      |      |
|-----------------|--------------|------|------|----------------|------|------|---------------|------|------|-----------|------|------|-----------|------|------|---------|------|------|
|                 | Máx          | Min  | Prom | Máx            | Min  | Prom | Máx           | Min  | Prom | Máx       | Min  | Prom | Máx       | Min  | Prom | Máx     | Min  | Prom |
| DBO             | 628          | 198  | 366  | 98             | 38   | 60   | 58            | 40   | 47   | 730       | 173  | 425  | 263       | 145  | 199  | 70      | 38   | 48   |
| DQO             | 820          | 142  | 487  | 650            | 140  | 389  | 500           | 114  | 285  | 2480      | 340  | 1183 | 930       | 220  | 544  | 640     | 110  | 317  |
| DBOs/DQO        | 4,42         | 0,32 | 1,31 | 0,47           | 0,06 | 0,22 | 0,49          | 0,08 | 0,22 | 1,02      | 0,18 | 0,48 | 1,20      | 0,20 | 0,45 | 0,37    | 0,07 | 0,22 |

## 5.4. ANÁLISIS DE LAS EFICIENCIAS OBTENIDAS EN CADA SISTEMA Y DE TODA LA PLANTA

Para poder evaluar el funcionamiento de los sistemas existentes se realizó una comparación entre las eficiencias esperadas según el Cuadro 13, las eficiencias teóricas según ecuaciones de diseño y las eficiencias experimentales comparando los valores de entrada y salida de cada sistema.

Debido a que los datos de diseño de la planta de tratamiento brindados en el Cuadro 5 y los datos de entrada medidos en campo no presentan variaciones considerables, se eligió, para efecto de cálculos, los valores en campo que se acercan más a las condiciones reales.

Se escogió el valor promedio de las cargas de DBO y DQO por considerar que son los valores que más se adecuan a las condiciones en general que presenta la planta.

Cuadro 33. Comparación de eficiencias de remoción de DQO en cada sistema.

| <b>Sistema</b> | <b>Entrada<br/>DQO (mg/L)</b> | <b>Salida<br/>DQO (mg/L)</b> | <b>Eficiencia<br/>esperada</b> | <b>Eficiencia<br/>teórica</b> | <b>Eficiencia<br/>experimental</b> |
|----------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| UASB           | 487                           | 389                          | 90%-95%                        | 73,20%                        | 20,10%                             |
| Filtro         | 389                           | 285                          | 60%-80%                        | 56,60%                        | 26,70%                             |

En el Cuadro 33 se puede apreciar que para el reactor UASB, la eficiencia teórica de remoción de DQO es mucho mayor a la que se obtiene de forma experimental; esto se debe a que las eficiencias teóricas dependen del TRH, y debido a que los valores obtenidos de este parámetro sobrepasan los esperados en una proporción considerablemente mayor, es de esperar que las eficiencias aumenten.

Por otro lado, se observa que la diferencia entre los valores de entrada y salida de DQO del reactor no varían ampliamente, razón por la que el porcentaje de eficiencia es menor, en este caso la diferencia de remoción puede deberse a la velocidad de choque entre las moléculas en el interior del reactor, que es un factor importante a tomar en cuenta con respecto a las eficiencias de remoción.

En el caso del filtro, las variaciones entre las eficiencias esperadas y la eficiencia teórica son similares, mientras que la eficiencia experimental si presenta una mayor diferencia, la reducción del valor puede deberse a que los tamaños de la roca que funciona como medio de soporte poseen variaciones visibles de tamaño entre ellas, lo que puede afectar la relación de vacíos y la retención de biomasa.

Cuadro 34. Comparación de eficiencias de remoción de DBO en cada sistema.

| <b>Sistema</b> | <b>Entrada<br/>DBO (mg/L)</b> | <b>Salida<br/>DBO (mg/L)</b> | <b>Eficiencia<br/>esperada</b> | <b>Eficiencia<br/>teórica</b> | <b>Eficiencia<br/>experimental</b> |
|----------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| UASB           | 366                           | 60                           | Na                             | 81,50%                        | 83,60%                             |
| Filtro         | 60                            | 47                           | 65%-80%                        | 76,90%                        | 4,70%                              |

En el Cuadro 34 se presentan las eficiencias de remoción de DBO en cada sistema de la planta, en el caso del reactor UASB se presentan eficiencias de remoción muy similares entre los valores teóricos y los valores experimentales, y este comportamiento se puede apreciar en las gráficas de DBO, donde la diferencia entre los valores de entrada a la planta y salida del reactor varían de manera considerable.

Esto puede deberse a la retención de sólidos tanto en el sedimentador primario como en la fase sólida en la parte inferior del reactor UASB, al removerse estos la carga orgánica disuelta en el agua residual disminuye.

En el caso del filtro percolador, las eficiencias de remoción experimental resultan mucho menores a las esperadas; mientras que el valor teórico oscila entre los valores deseados para el sistema.

Esto puede deberse a la mala distribución de los vacíos en el material de soporte, al igual que para la remoción de DQO, esto puede provocar que el agua residual pase a través del filtro sin proveerle del área superficial suficiente para la formación de la biopelícula de forma eficiente.

Cuadro 35. Eficiencias de remoción de DBO y DQO experimentales para el sistema conjunto de filtro y sedimentador secundario

|                   | <b>Entrada<br/>filtro</b> | <b>Vertido</b> | <b>Eficiencia<br/>experimental</b> |
|-------------------|---------------------------|----------------|------------------------------------|
| <b>DBO (mg/L)</b> | 60                        | 48             | 20,00%                             |
| <b>DQO (mg/L)</b> | 389                       | 317            | 18,51%                             |

En el Cuadro 35 se presenta la eficiencia del sistema conjunto del filtro con el sedimentador secundario, para el caso del DBO se aprecia una remoción considerable posterior al uso del sedimentador secundario; mientras que los valores de la remoción de DQO, presenta un comportamiento negativo debido a que la concentración a la salida del vertido es superior a la presentada en la salida del filtro.

Cuadro 36. Eficiencias de remoción de DBO y DQO experimentales para el tratamiento completo

|                   | <b>Entrada<br/>PTAR</b> | <b>Vertido</b> | <b>Eficiencia<br/>experimental</b> |
|-------------------|-------------------------|----------------|------------------------------------|
| <b>DBO (mg/L)</b> | 366                     | 48             | 86,90%                             |
| <b>DQO (mg/L)</b> | 487                     | 317            | 34,90%                             |

Finalmente en el Cuadro 36 se aprecian los valores de entrada a la planta en comparación con los valores de vertido, que permite observar la eficiencia total de la planta de tratamiento con respecto a las concentraciones de DBO y DQO, en general, se presentan eficiencias mayores de remoción de DBO.

## **CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1 Conclusiones**

- ✓ El tren de tratamiento funciona en su mayoría como separación física y los sistemas de reactor UASB y filtro percolador como tratamiento biológico. Las dimensiones de los sistemas son superiores a las necesarias para tratar el caudal entrante.
- ✓ Los sistemas del tren de tratamiento se adaptan al tipo de agua residual que es de carácter doméstico, para una población servida de aproximadamente 40 casas. La presencia en la entrada de la planta de valores superiores a los esperados de DBO y en algunos casos de nutrientes como el fósforo indican la presencia de contaminantes no convencionales.
- ✓ El tamaño de la infraestructura está limitado al espacio al área de 1515,66 m<sup>2</sup> por lo que la colocación de sistemas que complementen el tratamiento tienen que restringirse a las zonas libres y considerando los retiros que se deben cumplir según el Reglamento.
- ✓ La infraestructura requiere de pintura tanto en las zonas de concreto como en las partes metálicas, debido a lo corrosivo que resultan las aguas residuales. Además se requiere de cambios en los colores de las tuberías para que se identifique de forma correcta según el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales No.31545.
- ✓ Los parámetros de sólidos totales, volátiles y suspendidos totales analizados presentaron en algunos muestreos, valores mayores en el vertido que en la entrada de la planta de tratamiento, estos valores no varían de forma considerable con los rangos que se obtuvieron de los datos históricos suministrados por AyA, esto puede estar relacionado con la incorporación de sólidos en uno o varios de los sistemas de tratamiento durante el flujo del agua residual, ya sea por desprendimiento o resuspensión de sólidos. En general, cuando se observan estos comportamientos el resto de los sistemas si presenta remoción de sólidos, por lo que se relaciona la presencia de estos en gran parte por el arrastre de sólidos en el sedimentador secundario.
- ✓ La operación y mantenimiento de la planta representan un factor crucial para el correcto funcionamiento de los sistemas, así como para la adecuada eliminación de los lodos y la verificación del funcionamiento de las válvulas. También la remoción de sólidos

flotantes en la superficie del agua residual, así como las natas, para evitar la contaminación del agua ya tratada.

- ✓ Se pudo apreciar que la remoción de los residuos retenidos en la caja de rejillas si se realizan de forma diaria, y se hacen las mediciones de los parámetros establecidos en el reglamento y el manual de operación y mantenimiento.
- ✓ Con respecto a las malas prácticas observadas, en muchos de los sistemas se introduce agua por medio de las mangueras, como es el caso de las canoas del reactor, que se lavan constantemente de esta forma introduciendo un volumen de agua desconocido al sistema y afecta la velocidad de salida del sistema. Lo mismo ocurre en el caso del sedimentador secundario, que se mojan los sólidos suspendidos en la superficie para que estos desciendan, pero esto únicamente funciona como medida temporal, ya que se resuspenden en poco tiempo.
- ✓ En el caso del reactor UASB se esperarían mejores eficiencias de remoción si en el sistema se presentaran temperaturas mayores que beneficiaran un crecimiento de las bacterias anaerobias más cercano a los valores óptimos; se podrían utilizar sistemas de calentamiento de gas; pero debido a la baja producción de gas por los bajos caudales no se considera rentable.
- ✓ La recolección de gases la realiza el reactor UASB por medio de la trampa de humos y la trampa de llamas, como el sistema no es completamente hermético, al abrirse para realizar la limpieza de las canoas y demás, se deja escapar cierta cantidad de gas del sistema; además la producción del mismo es muy baja, lo cual se evidencia ya que con muy poca frecuencia se puede escuchar cuando se quema el gas metano en la chimenea, por lo que el uso de este como biogás es descartado.
- ✓ La colmatación de las válvulas de inspección provoca estancamientos en la salida de los mismos, lo que dificulta la verificación de los lodos y la purga a varios niveles del manto de lodos, ya que actualmente solo se pueden purgar los lodos más recientes por medio de la válvula de purga y los menos densos solo salen por la válvula de inspección.
- ✓ El problema del sellado de las canoas afecta la velocidad de salida del agua residual, debido a que se espera que salga en flujo laminar y que beneficie a la remoción de sólidos.
- ✓ La baja velocidad de flujo ascendente y los altos tiempos de retención de los sólidos en la planta dificultan la purga de los lodos y la entrada del afluente ya que estos aumentan

su densidad con el tiempo, esto a su vez perjudica el tratamiento, ya que como se pudo observar uno de los tubos de entrada ya se encuentra colmatado y por ende, el área de influencia de entrada aumenta y la distribución ya no es equitativa.

- ✓ El reactor UASB solo cuenta con una válvula de purga, que se localiza en la parte inferior del mismo, esto indica que al realizarse una purga de lodos, lo que se retira es el lodo nuevo, y este tiene menos tiempo para estabilizarse. Además los lodos viejos se mantienen por mucho tiempo en el sistema.
- ✓ Los bajos caudales de entrada en la planta y la falta de recirculación de agua al reactor UASB, afectan el tratamiento de las aguas disminuyendo la posibilidad de colisión entre las partículas y por ende reduciendo la eficiencia del sistema. Esto debido a que el sistema está diseñado para un caudal de 64,8 m<sup>3</sup>/d y el valor máximo medido de forma rutinaria en la planta es de 46,92 m<sup>3</sup>/d.
- ✓ Los procesos de nitrificación y desnitrificación se pueden observar en los valores de nutrientes obtenidos antes y después de pasar por el reactor UASB (Sistema de tratamiento anaerobio) y el filtro percolador (Sistema de tratamiento aerobio), los valores de nitrato obtenidos, son significativamente mayores a los de nitrógeno amoniacal y a los de nitrito, esto debido a la rapidez de oxidación que presenta el mismo y en el caso del reactor UASB por motivo de la oxigenación que recibe el agua al entrar al filtro percolador.
- ✓ Las eficiencias de remoción de DQO tanto del reactor UASB como del filtro percolador son inferiores a lo esperado; pero si es apreciable un comportamiento de remoción en cada sistema, ya que comparativamente los valores a la salida presentan un valor inferior que a la entrada.
- ✓ A pesar de que se esperan remociones de DBO mayores, posterior a un tratamiento aerobio, los porcentajes de remoción del reactor UASB superan de forma considerable los del filtro percolador, esto debido a las cargas de DBO tan altas a la entrada de la planta, y que no se está considerando el efecto que presenta la remoción de sólidos en el sedimentador primario.
- ✓ El efecto de remoción de DBO mayor que el DQO se le atribuye inicialmente a que los valores de entrada de DBO son superiores a los esperados, por lo que es más fácil remover una cantidad comparativamente mayor, además que el tiempo de retención en el reactor UASB es muy alto, lo que permite una mejor degradación de la materia

orgánica; pero esto no afecta en el caso del DQO, ya que estas dependen más de las reacciones químicas dentro del sistema.

- ✓ El filtro percolador si produce una disminución del nitrógeno amoniacal contenido en el agua, ya que afecta el proceso de nitrificación funcionando no solo como tratamiento físico; sino a su vez como tratamiento biológico por la formación de la biopelícula en el material de soporte.
- ✓ Las rocas volcánicas de mayor diámetro usadas en el medio de soporte sobrepasan el tamaño recomendado, lo que puede generar espacios vacíos mayores que permitan un flujo más libre de los sólidos que entran al filtro y permite la llegada de estos al sedimentador secundario ya que el área de contacto se reduce y la eficiencia de remoción por bacterias aerobias también disminuye.
- ✓ El filtro anterior presentaba una pendiente en la entrada por lo que la distribución del agua no era equitativa, y solo se localizaba en una esquina; además el sistema de ventilación que consistía en un tubo que venía de la parte inferior del filtro, hacía el exterior, esto no aseguraba una entrada adecuada de oxígeno al sistema y el tamaño del filtro era mucho menor; por lo que había menor volumen de material de soporte para retener biomasa, lo cual se mejora al incorporar zonas de ventilación en varios sitios del filtro, además de una distribución rotativa del agua de entrada y con las esponjas se amplían los espacios de retención de biomasa.
- ✓ Debido a que se observa menor concentración de sólidos suspendidos totales en la entrada del filtro que en la salida, se supone la entrada de sólidos de una fuente externa, que puede deberse al desprendimiento de la biomasa que se encuentra en el filtro, a la entrada de polvo y otras sustancias por los buques de ventilación y por posibles desprendimientos de partículas del material de soporte por desgaste.
- ✓ Se presenta una disminución de los sólidos totales, volátiles y sedimentables en la salida del filtro después de aproximadamente un mes de la colocación de las esponjas DHS y a la vez una estabilización de los valores obtenidos.
- ✓ Debido a la presencia visible de sólidos suspendidos en el sedimentador secundario, se puede apreciar en los valores obtenidos que la cantidad de sólidos suspendidos totales es en algunos casos superior a los valores obtenidos después del filtro, ya que hay arrastre de los mismos.

- ✓ El sedimentador secundario no presenta cambios significativos con respecto a la eliminación de sólidos totales, debido a que los valores obtenidos a la salida del filtro son similares a los obtenidos en el vertido, el mismo comportamiento se presenta con los nutrientes como nitrógeno y fósforo.

## **6.2 Recomendaciones**

- ✓ No es necesario cambiar los sistemas del tren de tratamiento existente; pero se pueden complementar con sistemas que mejoren las características del agua en el vertido.
- ✓ La planta tendría la capacidad de recibir agua proveniente de más casas de habitación; pero el área disponible no permite que se dé una expansión considerable, debido a que no se presentan muchos espacios sin construir en la urbanización.
- ✓ Con respecto a las características del agua residual que entra en la planta de tratamiento, en el caso de parámetros como el DBO y nutrientes como el fósforo que en algunos casos entran en concentraciones mayores a las esperadas, se recomienda investigar si en una o varias de las casas de la urbanización se están generando fuentes de contaminación no convencionales.
- ✓ Para un mejor control de la calidad de la planta, es recomendable que las mediciones de regencia ambiental se realicen conforme a las frecuencias recomendadas (trimestralmente) en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales N.º 33601, ya que según los datos históricos facilitados por AyA, algunos de los parámetros poseen variaciones considerables, que se pueden ver afectadas por factores climáticos y ambientales; pero para poder hacer una relación más fiable causa-efecto, se deben realizar las mediciones con un menor periodo de tiempo entre ellas; así como revisar la aplicación de los parámetros operativos.
- ✓ Debido al efecto de corrosión de las aguas residuales en el concreto se recomienda realizar con mayor frecuencia la pintura de las estructuras para evitar posibles desprendimientos del material por desgaste, se recomienda que se realice anualmente que es la misma frecuencia con la que se debe renovar la pintura anticorrosiva de las estructuras metálicas.
- ✓ Se deben pintar o reemplazar las tuberías para que cumplan con el código de colores establecido para las plantas de tratamiento de aguas residuales.

- ✓ En general los sistemas pertenecientes a la planta están sobredimensionados para el caudal de tratamiento, y debido a la escasez de agua que se presenta en la zona, sobretodo en época seca, puede ralentizar y afectar los sistemas, por lo que resultaría conveniente la instalación de un tanque de homogenización, que permita la entrada a la planta de caudales más constantes y a la vez asegure un volumen de operación adecuado. Se puede colocar en la entrada de la planta un vertedero de excedencias; para asegurar que los caudales mayores a un valor establecido según conveniencia sean almacenados en el tanque de homogeneización y compensen los bajos caudales de entrada en casos de escasez de agua en la zona.
- ✓ Se recomienda dar capacitaciones técnicas a los operarios encargados de la planta de tratamiento, ya que esto favorece el entendimiento de los mismos acerca de cómo funciona cada sistema de la planta y la capacidad de proceder de mejor forma ante cualquier circunstancia fuera de lo común que llegara a presentarse, a su vez, evita que se alteren las condiciones que requiere la planta para su correcto funcionamiento y previene las malas prácticas de operación que no se detallan en el manual de operación y mantenimiento.
- ✓ Para los sistemas de reactor UASB y sedimentador secundario se debe minimizar el uso de la manguera para no alterar el volumen y la velocidad de entrada y salida de los componentes. En el caso de la salida del reactor por la limpieza de las canoas, la dilución del agua puede afectar los procesos biológicos dentro del filtro percolador; mientras que en el sedimentador secundario puede propiciar la salida de los lodos al exceder los límites de los vertederos existentes; aparte de ser una solución temporal.
- ✓ En el reactor UASB se debe reemplazar el material de sellado para las uniones de las canoas con el objetivo de que el agua residual salga con flujo laminar a las mismas y sea transportado por estas hacia la tubería de salida que lleva al filtro percolador y de esta forma disminuir la cantidad de sólidos que entran al filtro y se controla la velocidad de entrada del afluente.
- ✓ Revisar las válvulas de inspección para verificar si es posible liberar el paso de los lodos sin necesidad de vaciar por completo el reactor, posteriormente considerar purgas con una frecuencia mayor para evitar estancamientos, esto debido a que los lodos se densifican y pueden llegar a obstruir las tuberías de infiltración. También se debe revisar

la válvula de purga que se localiza en la zona más baja del reactor, que expulsa los lodos más nuevos.

- ✓ Con la liberación de las tuberías de infiltración se espera mejoras en la velocidad de entrada al sistema, además la constancia de las purgas disminuyen la densificación de los lodos a niveles que obstruyan las tuberías.
- ✓ Con respecto al sistema de gases se recomienda revisar si no existen fugas en las trampas de humos y llamas, o en la tubería de salida; no se recomienda su uso para otros fines ya que la cantidad de gas metano obtenido es muy poca y no resulta rentable.
- ✓ Para mejorar las eficiencias de tratamiento del reactor UASB se recomienda la recirculación del agua al sistema, esto debido a que los caudales de entrada de la planta son muy bajos y las eficiencias de remoción son menores a lo esperado, además propicia la retención del volumen de operación que requiere el reactor.
- ✓ Para comprobar el correcto funcionamiento de las tuberías de infiltración, es recomendable vaciar en algún momento el sistema de manera que se asegure que el sistema quede completamente funcional, lo cual puede facilitar a su vez la limpieza de las válvulas, además, con motivo de verificar las dimensiones dadas en planos y así revisar si estas cumplen con las dimensiones deseadas y verificar la distribución y el área de influencia de los tubos de infiltración.
- ✓ Se recomienda tapar la zona de entrada de las aguas residuales al reactor, en la parte superior de este, debido a que al quedar expuesto a la intemperie en la época lluviosa se generan derrames por la colmatación de las tuberías de entrada según las experiencias mencionadas por los operadores de la planta, lo que afecta la velocidad de flujo ascendente y la resuspensión de las partículas dentro del reactor.
- ✓ Para investigaciones posteriores se puede analizar el tipo de lodo presente en la zona inferior del reactor para comprobar el tipo de lodo existente, así como los SST presentes y la densidad del lodo.
- ✓ En el filtro percolador se recomienda utilizar un material de soporte con mayor capacidad de retención de sólidos, como las esponjas colocadas en la primera capa, para disminuir los sólidos suspendidos que se concentran en el sedimentador secundario, además el tamaño de las rocas como material de soporte debería variar en rangos menores, ya que hay presencia de rocas de tamaños superiores e inferiores al

rango recomendado, lo que afecta los vacíos y la acción biológica de la biomasa adherida.

- ✓ Para mejorar las condiciones de vertido, se deben revisar las conexiones de la válvula de purga del reactor UASB para asegurar que no viertan de forma directa al cuerpo receptor y que pase al lecho de secado y a su vez utilizar de forma más frecuente el lecho de secado.
- ✓ Se debe aumentar la frecuencia de limpieza del sedimentador secundario para evitar la entrada de sólidos ya separados al agua tratada, ya que como se pudo apreciar, en el sedimentador hay presencia de sólidos suspendidos, que aumentan la carga orgánica en el vertido, ya que parte de estos sólidos pasan por sobre la lámina de retención de sólidos, previo al vertido.
- ✓ Se recomienda diseñar un vertedor adecuado para la retención de los sólidos en la superficie del sedimentador y que se complemente con una limpieza por parte del operador utilizando redes para retirar el exceso de sólidos.
- ✓ Se recomienda hacer mediciones de los nutrientes en el punto de salida al cuerpo de agua para revisar si este es capaz de diluir las concentraciones vertidas con el fin de que no generen problemas en el medio acuático o algún posible daño a la salud humana, esto debido a que para algunos nutrientes la concentración de salida es mayor a lo que se establece el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua Superficiales para evitar problemas en el medio acuático y a la salud humana.

## **CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA**

- aquatecnit. (2015). *Planta de tratamiento de aguas residuales industriales*. Extraído el 08 marzo, 2019 de <http://www.aquatecnit.com.pe/ptari.html>
- Badilla, G. (2012). *Manual de Operación y Mantenimiento Sistema de Tratamiento Santa Cecilia, Puriscal*. Puriscal: Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDCA) (s.f.). *Características de las aguas residuales*. Extraído el 08 marzo, 2019 de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos de Oxidación Bioquímica con Biomasa Fija*. México : Comisión Nacional del Agua.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente* . México: Comisión Nacional del Agua .
- Consejería de vivienda, obras públicas y vertebración del territorio. (s.f.). *La calidad del agua: Parámetros fisicoquímicos*. Extraído el 03 junio, 2019 de [http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion\\_ambiental/educ/publicaciones/ciclo\\_del\\_agua/cicag/2/2\\_5\\_1/main.html](http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_del_agua/cicag/2/2_5_1/main.html)
- Cyclus. (2002). *Tecnologías de aguas residuales: Tratamiento terciario* . Extraído el 03 junio, 2019 de <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/tratamiento-aguas/tratamiento-terciario/>
- Espigares, M., & Pérez, J. (1992). *Aguas residuales: Composición*. Extraído el 03 junio, 2019 de [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
- García, V. (2018). *70 % del agua residual generada por costarricenses carece de tratamiento*. Extraído el 08 marzo, 2019 de Universidad de Costa Rica: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/03/26/70--del-agua-residual-generada-por-costarricenses-carece-de-tratamiento.html>
- Instituto de Desarrollo Rural. (2014). *Informe de Caracterización Básica Territorio Turubares-Puriscal-Mora-Santa Ana*. San José, Costa Rica.
- Iñiguez, G., & Camacho, A. (2011). *Evaluación de un reactor de manto de lodo con flujo ascendente (UASB) con cambios de velocidad de alimentación*. México.
- López, E., Martínez, J. G., & García, J. L. (2014). *Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Suspendidos Volátiles*. San Pedro Pochutla.
- Martínez, L. (2010). *Estudio de la evolución de una ETAP para la adecuación legislativa*. Barcelona.

- Metcalf, & Eddy. (1985). *Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Barcelona: Labor.
- Ministerio de Ambiente y Energía . (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales*. Costa Rica .
- Mora, D., Mata, A., & Portuguez, C. (2016). *Agua para consumo humano y saneamiento y su relación con los indicadores básicos de salud en Costa Rica: Objetivos de desarrollo del milenio y la agenda para el 2030*. Costa Rica: Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- Observatorio del agua. (2015). *Taller de Aguas*. Extraído el 08 marzo, 2019 de [http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAguas2015/RAFA\\_final\\_curvas.pdf](http://agua.marn.gob.sv/Documentos/TallerAguas2015/RAFA_final_curvas.pdf)
- Ossio, V., & Acuña, E. (2013). *Eficiencia del sistema de esponjas colgantes DHS de primera generación en el tratamiento del efluente del reactor UASB*. Lima.
- Ramalho, R. (s.f.). *Pretratamientos y tratamientos primarios*. Extraído el 08 marzo, 2019 de [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/pretratamientos\\_tratamientos\\_primarios.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/pretratamientos_tratamientos_primarios.pdf)
- República de Ecuador. (s.f.). *Norma de calidad ambiental y descarga de efluentes*. Ecuador .
- Rodriguez, D. (2017). *Monitoreo y evaluación de una planta piloto para el tratamiento de agua residual por medio de un sistema de biomasa adherida con esponjas colgantes de flujo descendente, implementada como tratamiento secundario para el efluente de un sedimentador primario*. Costa Rica.
- Ronzano, E., & Dapena, J. (s.f.). *Eliminación de fósforo en aguas residuales*. Extraído el 03 junio, 2019 de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/fosforo.pdf>
- Suárez, J., & Jácome, A. (2007). *Eliminación de nitrógeno de las aguas residuales. Procesos de nitrificación y desnitrificación*. Coruña, España.

## **CAPITULO 8. ANEXOS**

### **A. Memoria de cálculo**

#### A.1. Revisión de la eficiencia del reactor UASB

Los principales elementos de diseño para el UASB son:

Carga de DQO diaria afluente ( $S_0$ ): 487 mg/L = 0,487 kg DQO/m<sup>3</sup>

Carga de DBO diaria afluente: 366 mg/L = 0,366 kg DBO/m<sup>3</sup>

Carga de DQO del reactor efluente ( $S_e$ ): 389 mg/L = 0,389 kg DQO/m<sup>3</sup>

Carga de DBO del reactor efluente: 60 mg/L = 0,060 kg DBO/m<sup>3</sup>

Caudal de entrada ( $Q_e$ ): 46,92 m<sup>3</sup>/d

- Calculo la carga de DQO del afluente:

$$L_0 = S_0 * Q_{entrada}$$

$$L_0 = 0,487 \text{ kg/m}^3 * 46,92 \text{ m}^3/\text{d} = 22,85 \text{ kg DQO/d}$$

- Calculo la carga de DBO del afluente

$$L_0 = 0,366 \text{ kg/m}^3 * 46,92 \text{ m}^3/\text{d} = 17,17 \text{ kg DBO/d}$$

- Calculo el tiempo de retención hidráulica a partir del volumen que posee el reactor UASB.

$$TRH = \frac{V}{Q_{entrada}}$$

$$TRH = \frac{27,984 \text{ m}^3}{46,92 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,596 \text{ d} = 14,31 \text{ h}$$

- Calculo la carga hidráulica volumétrica

$$CHV = \frac{1}{TRH}$$

$$CHV = \frac{1}{0,596} = 1,677 \text{ m}^3/\text{m}^3 * \text{d}$$

- Calculo de la carga orgánica volumétrica para obtener la cantidad de sustrato que ingresa por unidad de volumen del reactor:

$$COV = \frac{Q_e * kgDQO/m^3}{V}$$

$$COV = \frac{46,92 m^3/d * 22,85 kgDQO/m^3}{27,984m^3} = 47,265 kgDQO/m^3 * d$$

- Calculo la velocidad de flujo ascendente, esta es importante debido a que puede afectar el lecho de lodo:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{1,96m^3/h}{6,996m^2} = 0,279 m/h$$

- Estimo la eficiencia teórica esperada de remoción de DBO y DQO:

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * TRH^{-0,50})$$

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0,70 * 14,31^{-0,50}) = 81,5\%$$

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * TRH^{-0,35})$$

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0,68 * 14,31^{-0,35}) = 73,2\%$$

- Calculo de la eficiencia experimental obtenida de los valores de DBO y DQO de entrada y salida al reactor UASB, utilizando los valores promedio obtenidos

$$E_{DBO} = \frac{DBO_{entrada} - DBO_{salida}}{DBO_{entrada}} * 100$$

$$E_{DBO} = \frac{0,366 - 0,06}{0,366} * 100 = 83,6\%$$

$$E_{DQO} = \frac{DQO_{entrada} - DQO_{salida}}{DQO_{entrada}} * 100$$

$$E_{DQO} = \frac{487\text{mg/L} - 389\text{mg/L}}{487\text{mg/L}} * 100 = 20,1\%$$

#### A.2. Revisión de la eficiencia del filtro percolador

Los principales elementos de diseño para el UASB son:

Carga de DQO diaria afluyente ( $S_0$ ):  $389 \text{ mg/L} = 0,389 \text{ kg DQO/m}^3$

Carga de DBO diaria afluyente:  $60 \text{ mg/L} = 0,060 \text{ kg DBO/m}^3$

Carga de DQO del reactor efluente ( $S_e$ ):  $285 \text{ mg/L} = 0,285 \text{ kg DQO/m}^3$

Carga de DBO del reactor efluente:  $47 \text{ mg/L} = 0,047 \text{ kg DQO/m}^3$

Caudal de entrada ( $Q_e$ ):  $46,92 \text{ m}^3/\text{d}$

El filtro percolador no posee caudal de recirculación

- Calculo la carga de DQO del afluyente:

$$L_0 = S_0 * Q_{\text{entrada}}$$

$$L_0 = 0,389 \text{ kg/m}^3 * 46,92 \text{ m}^3/\text{d} = 18,25 \text{ kg DQO/d}$$

- Calculo la carga de DBO del afluyente

$$L_0 = 0,06 \text{ kg/m}^3 * 46,92 \text{ m}^3/\text{d} = 2,82 \text{ kg DBO/d}$$

- Calculo el tiempo de retención hidráulica a partir del volumen que posee el reactor UASB.

$$TRH = \frac{V}{Q_{\text{entrada}}}$$

$$TRH = \frac{6,108 \text{ m}^3}{46,92 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,130 \text{ d} = 3,12 \text{ h}$$

- Obtengo la eficiencia del filtro mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{100}{1 + 0,443 \sqrt{\frac{Wu}{V * F}}}$$

Siendo

Wu: Carga orgánica de ingreso al filtro (kg DBO/d)

F: Número de pasos de la materia orgánica (para recirculación 0, F=1)

V: Volumen del filtro (m<sup>3</sup>)

$$E_{DBO} = \frac{100}{1 + 0,443 \sqrt{\frac{2,82}{6,108}}} = 76,9\%$$

$$E_{DQO} = \frac{100}{1 + 0,443 \sqrt{\frac{18,25}{6,108}}} = 56,6\%$$

- Calculo de la eficiencia experimental obtenida de los valores de DBO y DQO de entrada y salida al filtro, utilizando los valores promedio obtenidos

$$E_{DBO} = \frac{DBO_{entrada} - DBO_{salida}}{DBO_{entrada}} * 100$$

$$E_{DBO} = \frac{0,06 - 0,047}{0,06} * 100 = 4,7 \%$$

$$E_{DQO} = \frac{DQO_{entrada} - DQO_{salida}}{DQO_{entrada}} * 100$$

$$E_{DQO} = \frac{389mg/L - 285mg/L}{389mg/L} * 100 = 26,7\%$$

## B. Cuadros de datos recolectados en la fase experimental

Cuadro B.1. Valores de conductividad obtenidos en cada muestreo

| Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ ) |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Punto de muestreo                  | 22-mar | 29-mar | 09-abr | 23-abr | 30-abr | 08-may | 15-may |
| Entrada PTAR                       | 467    | 703    | 306    | 483    | 1127   | 879    | 496    |
| RAFA                               | 1130   | 862    | 846    | 728    | 1170   | 961    | 698    |
| Salida Filtro                      |        | 701    | 668    | 639    | 1011   | 819    | 627    |
| Vertido                            | 1018   | 690    | 655    | 618    | 994    | 787    | 541    |

Cuadro B.2. Valores de potencial de hidrógeno obtenidos en cada muestreo

| Potencial de hidrógeno |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Punto de muestreo      | 22-mar | 29-mar | 09-abr | 23-abr | 30-abr | 08-may | 15-may |
| Entrada PTAR           | 6,94   | 7,16   | 7,55   | 8,29   | 6,46   | 7,87   | 8,36   |
| RAFA                   | 6,52   | 8,64   | 6,27   | 6,95   | 6,76   | 7,80   | 7,00   |
| Salida Filtro          |        | 7,25   | 7,55   | 7,50   | 7,25   | 7,27   | 7,22   |
| Vertido                | 6,71   | 7,60   | 7,08   | 7,52   | 7,13   | 6,54   | 7,26   |

Cuadro B.3. Valores de temperatura obtenidos en cada muestreo

| Temperatura       |        |        |        |        |        |        |  |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Punto de muestreo | 22-mar | 09-abr | 23-abr | 30-abr | 08-may | 15-may |  |
| Entrada PTAR      | 24,31  | 24,56  | 25,03  | 25,18  | 25,14  | 24,58  |  |
| RAFA              | 24,00  | 24,28  | 24,29  | 24,79  | 24,60  | 24,07  |  |
| Salida Filtro     |        | 23,72  | 23,58  | 24,12  | 24,02  | 24,10  |  |
| Vertido           | 24,02  | 24,12  | 23,54  | 23,83  | 23,92  | 26,69  |  |

Cuadro B.4. Valores de oxígeno disuelto obtenidos en cada muestreo

| Oxígeno disuelto (mg/L) |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Punto de muestreo       | 22-mar | 29-mar | 09-abr | 23-abr | 30-abr | 08-may | 15-may |
| Entrada PTAR            | 1,03   | 0,16   | 2,77   | 0,00   | 0,11   | 0,00   | 0,99   |
| RAFA                    | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   | 0,00   |
| Salida Filtro           |        | 3,83   | 3,36   | 2,63   | 1,98   | 0,27   | 5,55   |
| Vertido                 | 0,00   | 6,70   | 1,78   | 3,11   | 1,92   | 0,29   | 5,82   |

Cuadro B.5. Valores de demanda química de oxígeno obtenidos en cada muestreo

| DQO (mg/L)        |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 560        | 820        | 620        | 520        | 570        | 142        | 180        |
| Entrada filtro    | 650        | 330        | 460        | 390        | 140        | 165        | 590        |
| Salida filtro     | 500        | 220        | 380        | 150        | 420        | 114        | 210        |
| Válvula 5         | 2480       | 580        | 1820       | 1910       | 520        | 340        | 630        |
| Válvula 6         | 930        | 580        | 570        | 780        | 220        | 280        | 450        |
| Vertido           | 640        | 110        | 630        | 200        | 340        | 126        | 170        |

Cuadro B.6. Valores de demanda bioquímica de oxígeno obtenidos en cada muestreo

| DBO 5,20 (mg/L)   |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 220        | 333        | 198        | 349        | 440        | 628        | 397        |
| Entrada FAFA      | 40         | 98         | 38         | 42         | 65         | 72         | 68         |
| Salida FAFA       | 40         | 44         | 42         | 47         | 58         | 56         | 46         |
| Válvula 5         | 703        | 173        | 730        | 340        | 330        | 346        | 350        |
| Válvula 6         | 237        | 194        | 145        | 156        | 263        |            |            |
| Vertido           | 70         | 38         | 44         | 43         | 54         | 46         | 42         |

Cuadro B.7. Valores de la relación entre DBO/DQO obtenidos en cada muestreo

| DBO/DQO           |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 0,393      | 0,406      | 0,319      | 0,671      | 0,772      | 4,423      | 2,206      |
| Entrada filtro    | 0,061      | 0,297      | 0,082      | 0,107      | 0,465      | 0,439      | 0,116      |
| Salida filtro     | 0,079      | 0,200      | 0,110      | 0,313      | 0,138      | 0,491      | 0,219      |
| Válvula 5         | 0,283      | 0,298      | 0,401      | 0,178      | 0,635      | 1,018      | 0,556      |
| Válvula 6         | 0,254      | 0,334      | 0,254      | 0,200      | 1,195      | 0,000      | 0,000      |
| Vertido           | 0,110      | 0,345      | 0,069      | 0,214      | 0,159      | 0,365      | 0,247      |

Cuadro B.8. Valores de nitrato obtenidos en cada muestreo

| Nitrato (mg/L)    |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 3,2        | 20,0       | 12,0       | 16,0       | 42,0       | 34,0       | 36,0       |
| Entrada filtro    | 9,8        | 16,0       | 16,0       | 42,0       | 40,0       | 22,0       | 30,0       |
| Salida filtro     | 6,2        | 48,0       | 56,0       | 32,0       | 46,0       | 24,0       | 42,0       |
| Válvula 5         | 0,0        | 4,0        | 2,0        | 18,0       | 22,0       | 30,0       | 48,0       |
| Válvula 6         | 2,4        | 6,0        | 18,0       | 12,0       | 40,0       | 34,0       | 60,0       |
| Vertido           | 12,1       | 56,0       | 40,0       | 24,0       | 48,0       | 28,0       | 22,0       |

Cuadro B.9. Valores de nitrito obtenidos en cada muestreo

| Nitrito (mg/L)    |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 0,25       | 0,12       | 0,30       | 0,12       | 0,18       | 0,32       | 0,18       |
| Entrada filtro    | 0,01       | 0,80       | 0,20       | 0,10       | 0,50       | 0,08       | 0,10       |
| Salida filtro     | 1,40       | 11,00      | 7,40       | 3,26       | 3,40       | 4,48       | 1,58       |
| Válvula 5         | 0,00       | 0,20       | 0,10       | 0,08       | 0,06       | 0,04       | 0,18       |
| Válvula 6         | 0,02       | 0,20       | 0,20       | 0,04       | 0,06       | 0,08       | 0,08       |
| Vertido           | 1,12       | 2,04       | 9,55       | 3,32       | 2,18       | 3,10       | 1,48       |

Cuadro B.10. Valores de nitrógeno amoniacal obtenidos en cada muestreo

| Nitrogeno amoniacal (mg/L) |            |            |            |            |            |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo          | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR               | 2,15       | 1,80       | 1,50       | 1,00       | 3,00       | 2,60       | 0,80       |
| Entrada filtro             | 0,15       | 0,20       | 1,50       | 1,00       | 1,00       | 0,80       | 0,60       |
| Salida filtro              | 1,05       | 1,80       | 0,50       | 0,40       | 0,40       | 0,20       | 0,40       |
| Válvula 5                  | 2,65       | 0,80       | 2,00       | 8,20       | 1,00       | 1,40       | 1,00       |
| Válvula 6                  | 2,40       | 4,40       | 1,00       | 1,80       | 0,80       | 0,40       | 0,60       |
| Vertido                    | 0,65       | 0,15       | 1,00       | 0,60       | 1,40       | 0,40       | 0,20       |

Cuadro B.11. Valores de fósforo obtenidos en cada muestreo

| Fósforo (mg/L)    |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 5,0        | 45,6       | 10,6       | 11,4       | 30,8       | 22,0       | 20,8       |
| Entrada filtro    | 9,4        | 25,8       | 23,6       | 20,0       | 28,4       | 23,6       | 22,8       |
| Salida filtro     | 37,6       | 25,4       | 24,4       | 22,8       | 26,0       | 23,4       | 23,8       |
| Válvula 5         | 30,4       | 50,4       | 26,2       | 30,2       | 29,0       | 27,0       | 26,6       |
| Válvula 6         | 33,6       | 29,8       | 23,6       | 26,0       | 29,8       | 22,6       | 21,0       |
| Vertido           | 42,6       | 35,4       | 22,6       | 22,4       | 27,4       | 26,8       | 20,6       |

Cuadro B.12. Valores de sólidos totales obtenidos en cada muestreo

| Sólidos Totales   |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Punto de muestreo | Muestreo 1 | Muestreo 2 | Muestreo 3 | Muestreo 4 | Muestreo 5 | Muestreo 6 | Muestreo 7 |
| Entrada PTAR      | 510        | 860        | 420        | 400        | 370        | 1080       | 460        |
| Entrada filtro    | 640        | 590        | 600        | 800        | 450        | 480        | 530        |
| Salida filtro     | 560        | 570        | 480        | 750        | 600        | 590        | 570        |
| Válvula 5         | 32580      | 870        | 70690      | 12920      | 1170       | 1250       | 1730       |
| Válvula 6         | 1210       | 980        | 570        | 490        | 870        | 570        | 710        |
| Vertido           | 660        | 770        | 450        | 640        | 510        | 520        | 490        |

Cuadro B.13. Valores de sólidos volátiles obtenidos en cada muestreo

| <b>Sólidos Volátiles</b> |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Punto de muestreo</b> | <b>Muestreo 1</b> | <b>Muestreo 2</b> | <b>Muestreo 3</b> | <b>Muestreo 4</b> | <b>Muestreo 5</b> | <b>Muestreo 6</b> | <b>Muestreo 7</b> |
| Entrada PTAR             | 310               | 700               | 380               | 200               | 50                | 840               | 220               |
| Entrada filtro           | 440               | 270               | 440               | 520               | 50                | 200               | 450               |
| Salida filtro            | 440               | 250               | 240               | 630               | 320               | 310               | 330               |
| Válvula 5                | 22420             | 150               | 69970             | 10720             | 650               | 650               | 1170              |
| Válvula 6                | 650               | 620               | 250               | 90                | 350               | 330               | 430               |
| Vertido                  | 220               | 730               | 250               | 480               | 190               | 320               | 290               |

Cuadro B.14. Valores de sólidos suspendidos totales obtenidos en cada muestreo

| <b>Sólidos Suspendidos Totales</b> |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Punto de muestreo</b>           | <b>Muestreo 1</b> | <b>Muestreo 2</b> | <b>Muestreo 3</b> | <b>Muestreo 4</b> | <b>Muestreo 5</b> | <b>Muestreo 6</b> | <b>Muestreo 7</b> |
| Entrada PTAR                       | 200               | 260               | 360               | 200               | 10                | 460               | 110               |
| Entrada filtro                     | 150               | 90                | 60                | 170               | 40                | 10                | 70                |
| Salida filtro                      | 150               | 30                | 30                | 320               | 10                | 80                | 90                |
| Válvula 5                          | 32150             | 370               | 70040             | 12560             | 650               | 710               | 1370              |
| Válvula 6                          | 920               | 550               | 240               | 140               | 440               | 150               | 330               |
| Vertido                            | 120               | 80                | 10                | 120               | 70                | 190               | 90                |

Cuadro B.15. Valores de sólidos sedimentables obtenidos en cada muestreo

| <b>Sólidos sedimentables</b> |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Punto de muestreo</b>     | <b>Muestreo 1</b> | <b>Muestreo 2</b> | <b>Muestreo 3</b> | <b>Muestreo 4</b> | <b>Muestreo 5</b> | <b>Muestreo 6</b> | <b>Muestreo 7</b> |
| Entrada PTAR                 | 1,00              | 10,0              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 3,00              | 0,00              |
| Entrada FAFA                 | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              |
| Salida FAFA                  | 1,90              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              |
| Válvula 5                    | 720               | 32,5              | 730               | 730               | 21,0              | 0,05              | 0,02              |
| Válvula 6                    | 19,0              | 7,00              | 2,30              | 2,70              | 6,00              | 0,01              | 0,04              |
| Vertido                      | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              | 0,00              |