

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Evaluación del sistema de filtro biológico tipo Keisya en la 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 de Ingeniería Civil

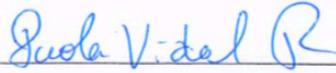
Presenta:

Luis Enrique Gamboa Estrada

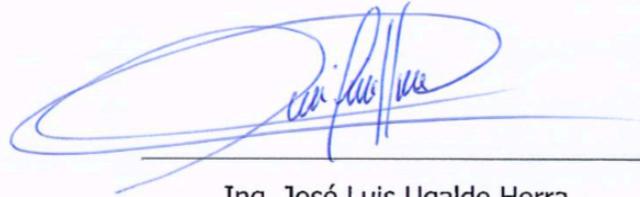
Directora del proyecto de graduación:

Ing. Paola Vidal Rivera

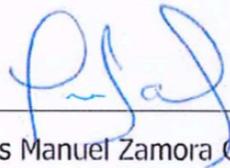
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



Ing. Paola Vidal Rivera
Directora



Ing. José Luis Ugalde Herra
Asesor



Ing. Luis Manuel Zamora González
Asesor



Luis Enrique Gamboa Estrada
Autor

Fecha: 2021, Noviembre, 01

El suscrito, Luis Enrique Gamboa Estrada, cédula 1-1635-0703, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B42694**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Evaluación del sistema de filtro biológico tipo Keisya en la 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 No 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 Sonia Estrada González, por ser mi apoyo incondicional a lo largo de la carrera y en toda mi vida.

A mi padre Enrique Gamboa Elizondo, por siempre darme apoyo y fuerzas para concluir mis estudios y lograr mis metas.

A mi abuela Luz Milda González Bolaños, que hoy desde el cielo me acompaña y me cuida, gracias por el ejemplo de fortaleza.

A mis hermanos Verónica Serrano Estrada y Fabián Serrano Estrada, por ser mi apoyo y ejemplo a seguir.

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional.

A la profesora Paola Vidal por su guía profesional durante estos años.

Al comité asesor que me guió durante la realización de este trabajo final de graduación.

A mis amigos, familiares y compañeros especialmente Mariana Vargas Matamoros por ser un apoyo emocional y académico durante mi etapa universitaria.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	29
1.1 Introducción	29
1.2 Justificación del problema	29
1.3 Importancia	30
1.4 Objetivos	31
1.4.2 Objetivos específicos.....	31
1.5 Delimitación del problema.....	31
1.5.1 Alcance.....	31
1.5.2 Limitaciones	33
1.6 Antecedentes teóricos y prácticos.....	34
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	38
2.1 Aguas residuales	38
2.2 Procesos de tratamientos biológicos	40
2.2.1 Tratamientos aerobios.....	40
2.2.2 Tratamientos anaerobios.....	41
2.3 Etapas para el tratamiento de aguas residuales.....	42
2.3.1 Pretratamiento.....	42
2.3.2 Tratamiento primario.....	42
2.3.3 Tratamiento secundario.....	44
2.3.4 Tratamiento terciario	49
2.4 Parámetros de análisis para vertido de aguas residuales	49
2.4.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	49
2.4.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	50
2.4.3 Potencial de Hidrógeno (pH).....	50
2.4.4 Temperatura (T).....	51
2.4.5 Oxígeno Disuelto (OD)	51
2.4.6 Conductividad eléctrica	52
2.4.7 Nutrientes: Fósforo y Nitrógeno.....	52

2.4.8	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	53
2.4.9	Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).....	54
2.5	Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales	54
<i>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO</i>		56
3.1	Etapa I. Investigación.....	56
3.2	Etapa II. Caracterización de la PTAR y filtro biológico tipo Keisya.....	57
3.3	Etapa III. Experimentación.....	57
3.4	Etapa IV. Análisis de resultados	58
<i>CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL FILTRO BIOLÓGICO TIPO KEISYA.....</i>		59
4.1	Generalidades del filtro biológico tipo Keisya	59
4.2	Generalidades de la planta piloto tipo Keisya ubicada en la PTAR.....	60
4.3	Condiciones de estudio del Keisya	64
4.3.1	Caudal	64
4.3.2	Tiempo de retención hidráulica (TRH)	66
4.3.3	Carga hidráulica volumétrica	67
4.3.4	Carga hidráulica superficial	69
4.3.5	Carga orgánica volumétrica	69
<i>CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA URBANIZACIÓN SANTA CECILIA DE PURISCAL.....</i>		73
5.1	Descripción del sitio	73
5.1.1	Ubicación	73
5.1.2	Condiciones climáticas	74
5.1.3	Topografía	78
5.2	Generalidades de la PTAR.....	78
5.2.1	Descripción de los componentes de la PTAR	80
5.2.2	Información de diseño de la PTAR	89
5.3	Operación y mantenimiento de la PTAR	90

5.4 Datos históricos en la PTAR	91
5.4.1 Reportes operacionales históricos	91
5.4.2 Resultados del Laboratorio Nacional de Aguas.....	93
5.5 Resultados obtenidos de la investigación en la PTAR	102
5.5.1 Resultados de las pruebas de parámetros de control.....	102
5.5.2 Resultados las pruebas de nutrientes: nitrito, nitrato nitrógeno amoniacal y fósforo	106
5.5.3 Resultados de las pruebas de sólidos: totales, suspendidos totales y volátiles.....	110
5.5.4 Resultados de las pruebas de DQO y DBO	113
<i>CAPÍTULO 6. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS.....</i>	<i>117</i>
6.1 Condiciones de muestreo	117
<i>CAPÍTULO 7. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....</i>	<i>124</i>
7.1 Resultados de las pruebas de parámetros de control.....	125
7.1.1 Potencial de hidrógeno	125
7.1.2 Conductividad	129
7.1.3 Sólidos disueltos totales.....	132
7.1.4 Oxígeno disuelto	136
7.2 Resultados de las pruebas de nutrientes: nitrito, nitrato, nitrógeno amoniacal y fósforo	139
7.2.1 Nitrito.....	139
7.2.2 Nitrato.....	143
7.2.3 Nitrógeno amoniacal.....	146
7.2.4 Fósforo	150
7.3 Resultados de las pruebas de sólidos: totales, suspendidos totales y volátiles... 153	
7.3.1 Sólidos totales	153
7.3.2 Sólidos suspendidos totales	156
7.3.3 Sólidos volátiles.....	160
7.4 Resultados de las pruebas de DQO y DBO.....	163
7.4.1 Demanda química de oxígeno (DQO).....	163
7.4.2 Demanda bioquímica de oxígeno.....	166
7.4.3 Relación DBO/DQO	170

7.5 Resultados de las pruebas de eficiencia del filtro biológico tipo Keisya	172
CAPÍTULO 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	177
8.1 Análisis cualitativo del filtro biológico tipo Keisya	177
8.2 Análisis de resultados de parámetros de control	181
8.2.1 Potencial de hidrógeno	181
8.2.2 Conductividad	182
8.2.3 Sólidos disueltos totales.....	182
8.2.4 Oxígeno disuelto	183
8.3 Análisis de resultados de nutrientes	184
8.3.1 Nitrito.....	184
8.3.2 Nitrato.....	184
8.3.3 Nitrógeno amoniacal.....	185
8.3.4 Fósforo	186
8.4 Análisis de resultados de sólidos	186
8.4.1 Sólidos totales.....	187
8.4.2 Sólidos suspendidos totales.....	187
8.4.3 Sólidos volátiles.....	188
8.5 Análisis de resultados de DBO y DQO	189
8.6 Análisis de la eficiencia experimental del filtro biológico tipo Keisya	190
CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN	195
Filtro biológico tipo Keisya	195
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Cecilia de Puriscal	197
RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	199
Filtro biológico tipo Keisya	199
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Cecilia de Puriscal	200
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	202
ANEXOS.....	207
A. Memoria de cálculo	207
A.1 Cálculo de condiciones de muestreo del Keisya	207

A.2 Revisión de la eficiencia del filtro biológico tipo Keisya	210
A.3 Cálculo de la varianza y el promedio	210
B. Resultados de la investigación.....	211
C. Pruebas de laboratorio.....	219
C. 1 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	219
C.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	222
C.3 Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales	224
C.4 Sólidos Volátiles	227
C.5 Nitrito.....	227
C.6 Nitrato.....	228
C.7 Nitrógeno amoniacal.....	229
C.8 Fósforo	230
C.9 Parámetros de control	231
D. Información relevante	233
D.1 Proyectos anteriores.....	233

Tabla de figuras

Figura 1. Reactor anaerobio de flujo ascendente	44
Figura 2. Esquema del filtro percolador de flujo descendente	45
Figura 3. Esquema del funcionamiento del filtro percolador de flujo descendente	46
Figura 4. Estructura del reactor de esponjas colgantes de flujo descendente	47
Figura 5. Sistema de cámaras de suelo inclinado	48
Figura 6. Esquema metodológico.....	56
Figura 7. Estructura de las cámaras inclinadas	59
Figura 8. Estructura del filtro biológico Keisya	61
Figura 9. Vista superior de una caja del sistema	61
Figura 10. Vista lateral de una caja del sistema.....	61
Figura 11. Entrada y dirección del fluido en el sistema.....	62
Figura 12. Condición de las esponjas de poliuretano con biomasa	63
Figura 13. Tuberías de salida del Keisya	63
Figura 14. Conexión del UASB al Keisya y filtro percolador	66
Figura 15. Ubicación de la PTAR en estudio	74
Figura 16. Temperaturas máximas y mínimas promedio.....	75
Figura 17. Temperaturas promedio del agua en Santiago Puriscal	76
Figura 18. Probabilidad diaria de precipitación en Santiago de Puriscal	76
Figura 19. Precipitación de lluvia mensual promedio.....	77
Figura 20. Porcentajes de humedad categorizado por el punto de rocío	77
Figura 21. Rangos de elevación en el territorio.....	78
Figura 22. Diagrama de los componentes de la PTAR	79
Figura 23. Caja de rejillas.....	80
Figura 24. Estructura del desarenador	81
Figura 25. Entrada de las aguas residuales al desarenador.....	82
Figura 26. Dimensiones del vertedero triangular.....	82
Figura 27. Trampa de grasas	83
Figura 28. Acceso al UASB.....	84

Figura 29. Vista superior del sistema UASB	84
Figura 30. Vista desde la parte superior del filtro percolador	85
Figura 31. Panel de control del filtro percolador	86
Figura 32. Sedimentador secundario	87
Figura 33. Lechos de secado.....	87
Figura 34. Filtro de carbón activado	88
Figura 35. Interior del filtro de carbón activo	89
Figura 36. Gráfico de dispersión de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	94
Figura 37. Gráfico de dispersión de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) .	95
Figura 38. Gráfico de dispersión de los Sólidos Totales (ST)	96
Figura 39. Gráfico de dispersión de los Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	97
Figura 40. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Amoniacal	98
Figura 41. Gráfico de dispersión del Fósforo total	99
Figura 42. Gráfico de dispersión del Potencial de Hidrógeno (pH)	100
Figura 43. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO.....	101
Figura 44. Gráfico de cajas del potencial de hidrógeno en la PTAR	102
Figura 45. Gráfico de cajas de conductividad en la PTAR	103
Figura 46. Gráfico de cajas de sólidos disueltos totales en la PTAR	104
Figura 47. Gráfico de cajas del oxígeno disuelto en la PTAR	105
Figura 48. Gráfico de cajas del nitrito presente en la PTAR	106
Figura 49. Gráfico de cajas del nitrato presente en la PTAR	107
Figura 50. Gráfico de cajas del nitrógeno amoniacal presente en la PTAR	108
Figura 51. Gráfico de cajas del fósforo presente en la PTAR.....	109
Figura 52. Gráfico de cajas de los sólidos totales presentes en la PTAR.....	110
Figura 53. Gráfico de cajas de los sólidos suspendidos totales presentes en la PTAR	111
Figura 54. Gráfico de cajas de los sólidos volátiles presentes en la PTAR.....	112
Figura 55. Gráfico de cajas de la demanda química de oxígeno presente en la PTAR	113

Figura 56. Gráfico de cajas de la demanda bioquímica de oxígeno presente en la PTAR	114
Figura 57. Gráfico de cajas de la relación DQO/DBO presente en la PTAR	115
Figura 58. Ubicación de los puntos de muestreo.....	118
Figura 59. Punto 1 de muestreo: Caja de rejillas	119
Figura 60. Punto 2 de muestreo: Entrada al filtro percolador.....	120
Figura 61. Punto 3 de muestreo: Salida del filtro percolador.....	121
Figura 62. Punto 4 y 5 de muestreo: torres del sistema Keisya	122
Figura 63. Punto 6 de muestreo: Salida PTAR	123
Figura 64. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	125
Figura 65. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	126
Figura 66. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	126
Figura 67. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	127
Figura 68. Gráfico de dispersión del pH en todos los puntos medidos	127
Figura 69. Gráfico de dispersión del pH a la entrada y salida del Keisya	128
Figura 70. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min.....	129
Figura 71. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min.....	129
Figura 72. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min.....	130
Figura 73. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min.....	130
Figura 74. Gráfico de dispersión de la conductividad en todos los puntos medidos	131

Figura 75. Gráfico de dispersión de la conductividad a la entrada y salida del Keisya	131
Figura 76. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min	132
Figura 77. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min	133
Figura 78. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min	133
Figura 79. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min	134
Figura 80. Gráfico de dispersión de los sólidos disueltos totales en todos los puntos medidos	134
Figura 81. Gráfico de dispersión de los sólidos disueltos totales a la entrada y salida del Keisya	135
Figura 82. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min.....	136
Figura 83. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min.....	136
Figura 84. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min.....	137
Figura 85. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min.....	137
Figura 86. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto en todos los puntos medidos	138
Figura 87. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto a la entrada y salida del Keisya	138
Figura 88. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	139
Figura 89. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	140

Figura 90. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	140
Figura 91. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	141
Figura 92. Gráfico de dispersión de nitrito en la entrada y salida del Keisya.....	141
Figura 93. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	143
Figura 94. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	143
Figura 95. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	144
Figura 96. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	144
Figura 97. Gráfico de dispersión de nitrato a la entrada y salida del Keisya	145
Figura 98. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	146
Figura 99. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	147
Figura 100. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	147
Figura 101. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	148
Figura 102. Gráfico de dispersión de nitrógeno amoniacal en todos los puntos de muestreo	148
Figura 103. Gráfico de dispersión de nitrógeno amoniacal a la entrada y salida del Keisya.....	149
Figura 104. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	150
Figura 105. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	150

Figura 106. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	151
Figura 107. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	151
Figura 108. Gráfico de dispersión de fósforo a la entrada y salida del Keisya...	152
Figura 109. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min.....	153
Figura 110. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min.....	153
Figura 111. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min.....	154
Figura 112. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min.....	154
Figura 113. Gráfico de dispersión de sólidos totales a la entrada y salida del Keisya	155
Figura 114. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	156
Figura 115. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	157
Figura 116. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	157
Figura 117. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	158
Figura 118. Gráfico de dispersión de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del Keisya	158
Figura 119. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales a la salida de la PTAR.....	159
Figura 120. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	160

Figura 121. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	160
Figura 122. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min.....	161
Figura 123. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	161
Figura 124. Gráfico de dispersión de sólidos volátiles en los puntos de muestreo	162
Figura 125. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	163
Figura 126. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	163
Figura 127. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	164
Figura 128. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	164
Figura 129. Gráfico de dispersión de DQO a la entrada y salida del Keisya	165
Figura 130. Gráfico de dispersion de DQO a la salida de la PTAR.....	165
Figura 131. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	166
Figura 132. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	167
Figura 133. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	167
Figura 134. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	168
Figura 135. Gráfico de dispersión de DBO a la entrada y salida del Keisya	168
Figura 136. Gráfico de dispersión de DBO a la salida de la PTAR.....	169
Figura 137. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO en todos los puntos de muestreo	170

Figura 138. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min	170
Figura 139. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min	171
Figura 140. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min	171
Figura 141. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min	172
Figura 142. Saturación de agua en el Keisya.....	178
Figura 143. Reparación realizada en la tubería de salida de la torre 1.....	178
Figura 144. Daños en la estructura del Keisya.....	179
Figura 145. Afectación de la humedad en la estructura del Keisya.....	180
Figura 146. Condiciones físicas externas del Keisya	180
Figura 147. Crecimiento de vegetación en el Keisya	181
Figura 148. Digestor de DQO.....	220
Figura 149. Viales de rango alto	221
Figura 150. Colorímetro HACH DR 900	221
Figura 151. Equipo de medición de DBO.....	222
Figura 152. Equipo de medición de DBO VELP Científica.....	223
Figura 153. Hidróxido de sodio	223
Figura 154. Incubadora ambiental EQUATHERM	224
Figura 155. Horno de marca EQUATHERM.....	225
Figura 156. Balanza de precisión de marca ADAM	226
Figura 157. Filtro de papel Sartorius.....	226
Figura 158. Mufla de la marca Analytical	227
Figura 159. Reactivo al nitrito denominado Nitriver3	228
Figura 160. Reactivo al nitrato NitraVer5	229
Figura 161. Estabilizador mineral, alcohol de polivinilo y Nessler	230
Figura 162. Reactivo al fósforo PhosVer3	231
Figura 163. Multiparámetros marca HANNA Instruments	232

Figura 164. Medidor de oxígeno disuelto de mesa marca OAKTON DO 2700 ... 232

Tabla de cuadros

Cuadro 1. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento aerobio de aguas residuales.....	41
Cuadro 2. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento anaerobio de aguas residuales.....	42
Cuadro 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales de tipo ordinario vertidas a un cuerpo receptor ...	55
Cuadro 4. Dimensiones de las cajas de poliestireno	67
Cuadro 5. Tiempos de retención hidráulica estimados totales del Keisya.....	67
Cuadro 6. Carga hidráulica volumétrica para la totalidad del filtro biológico tipo Keisya.....	68
Cuadro 7. Carga hidráulica superficial para toda la unidad de filtro biológico tipo Keisya.....	69
Cuadro 8. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con el promedio de los valores de DBO.....	70
Cuadro 9. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con los valores máximo y mínimo de DBO	70
Cuadro 10. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con el promedio de los valores de DQO.....	71
Cuadro 11. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con los valores máximo y mínimo de DQO.....	71
Cuadro 12. Parámetros de diseño de los sistemas de tratamiento de la PTAR....	89
Cuadro 13. Concentraciones y carga orgánica de diseño de los sistemas de tratamiento	90
Cuadro 14. Funciones de operación y mantenimiento realizadas en la PTAR y su frecuencia	90
Cuadro 15. Estadística de monitoreo realizada por el ente generador.....	92
Cuadro 16. Resultados de análisis del Laboratorio Análisis San Martín de mayo 2020	92

Cuadro 17. Resultados de análisis del Laboratorio Nacional de Aguas de noviembre 2020	92
Cuadro 18. Resultados obtenidos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) ...	93
Cuadro 19. Resultados obtenidos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	94
Cuadro 20. Resultados obtenidos de los Sólidos Totales (ST)	95
Cuadro 21. Resultados obtenidos de los Sólidos Suspendidos Totales (SST)	96
Cuadro 22. Resultados obtenidos de Nitrógeno Amoniacal	97
Cuadro 23. Resultados obtenidos de Fósforo.....	98
Cuadro 24. Resultados obtenidos de Potencial de Hidrógeno (pH)	99
Cuadro 25. Resultados obtenidos de la relación DBO/DQO.....	100
Cuadro 26. Resultados de pH obtenidos en la PTAR	102
Cuadro 27. Resultados obtenidos de conductividad en la PTAR	103
Cuadro 28. Resultados obtenidos de sólidos disueltos totales en la PTAR.....	104
Cuadro 29. Resultados obtenidos de oxígeno disuelto en la PTAR.....	105
Cuadro 30. Resultados obtenidos de nitrito en la PTAR.....	106
Cuadro 31. Resultados obtenidos de nitrato en la PTAR.....	107
Cuadro 32. Resultados obtenidos de nitrógeno amoniacal en la PTAR.....	108
Cuadro 33. Resultados obtenidos de fósforo en la PTAR	109
Cuadro 34. Resultados obtenidos de sólidos totales en la PTAR.....	110
Cuadro 35. Resultados obtenidos de sólidos suspendidos totales en la PTAR...	111
Cuadro 36. Resultados obtenido de sólidos volátiles en la PTAR	112
Cuadro 37. Resultados de DQO obtenidos en la PTAR.....	113
Cuadro 38. Resultados obtenidos de DBO en la PTAR.....	114
Cuadro 39. Resultados obtenidos de la relación DBO/DQO en la PTAR.....	116
Cuadro 40. Condiciones climáticas durante los muestreos realizados	117
Cuadro 41. Resumen de valores obtenidos de pH en los muestreos.....	128
Cuadro 42. Resumen de valores obtenidos de conductividad eléctrica en los muestreos	131
Cuadro 43. Resumen de valores obtenidos de sólidos disueltos totales en los muestreos	135

Cuadro 44. Resumen de valores obtenidos de oxígeno disuelto en los muestreos	138
Cuadro 45. Resumen de valores obtenidos de nitrito en los muestreos	142
Cuadro 46. Resumen de valores obtenidos de nitrato en los muestreos	145
Cuadro 47. Resumen de valores obtenidos de nitrógeno amoniacal en los muestreos	149
Cuadro 48. Resumen de valores obtenidos de fósforo en los muestreos.....	152
Cuadro 49. Resumen de valores obtenidos de sólidos totales en los muestreos	155
Cuadro 50. Resumen de valores obtenidos de sólidos suspendidos totales en los muestreos	159
Cuadro 51. Resumen de valores obtenidos de sólidos volátiles en los muestreos	162
Cuadro 52. Resumen de valores obtenidos de DQO en los muestreos	165
Cuadro 53. Resumen de valores obtenidos de DBO en los muestreos	169
Cuadro 54. Resumen de valores obtenidos de la relación DBO/DQO en los muestreos	172
Cuadro 55. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de DBO	173
Cuadro 56. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de DBO.....	173
Cuadro 57. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de DBO.....	173
Cuadro 58. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de SST	174
Cuadro 59. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de SST	174
Cuadro 60. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de SST	174
Cuadro 61. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de DQO	175

Cuadro 62. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de DQO	175
Cuadro 63. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de DQO	175
Cuadro 64. Eficiencias experimentales del filtro percolador utilizando valores promedio de DBO, DQO y SST	176
Cuadro 65. Calidad del agua residual a la entrada del Keisya y del experimento de aguas grises en Japón.....	191

Abreviaturas

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

CHS: Carga hidráulica superficial

CHV: Carga hidráulica volumétrica

COV: Carga orgánica volumétrica

DBO: Demanda bioquímica de oxígeno

DHS: Esponjas colgantes de flujo descendente

DQO: Demanda química de oxígeno

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

LNA: Laboratorio Nacional de Aguas

OD: Oxígeno disuelto

pH: Potencial de hidrógeno

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

Q: Caudal

ST: Sólidos totales

SSed: Sólidos sedimentables

SST: Sólidos suspendidos totales

SV: Sólidos volátiles

T: Temperatura

TRH: Tiempo de retención hidráulica

UASB: Reactor anaerobio de flujo ascendente

Gamboa Estrada, Luis Enrique

Evaluación del sistema de filtro biológico tipo Keisya en la 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.:

L.E.Gamboa E. 2021.

XXVIII, 178, [27]h; ils. col. – 34 refs.

Resumen

Este trabajo final de graduación se realizó con el objetivo de analizar la efectividad del filtro biológico tipo Keisya ubicado de forma experimental dentro la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal por el estudiante Motoi Miyake. El Keisya se encuentra formado por dos torres, está paralelo al filtro percolador, recibe las aguas residuales provenientes del UASB y su salida conecta con el sedimentador secundario.

Se tomaron muestras de agua residual de las distintas unidades de tratamiento de la PTAR y el filtro Keisya, para analizar su comportamiento mediante ensayos de laboratorio. Se comparan los resultados obtenidos de eficiencia, remoción y capacidad de carga del Keisya con los parámetros dados en experimentaciones anteriores por el filtro percolador ubicado en la misma PTAR, y se finaliza con el planteamiento de recomendaciones para el mejoramiento del sistema.

La experimentación se realizó variando el caudal de entrada al filtro tipo Keisya (1,2,3 y 4 L/min en cada torre) obteniéndose que con el caudal de entrada de 4L/min en cada torre se presentan fallas en el sistema como saturación y derrames de agua. El sistema trabaja en las mejores condiciones con el caudal de 2 L/min mostrando eficiencias experimentales mayores a las del filtro percolador al analizar el DBO y DQO por lo que se recomienda el uso de este caudal y además, se recomienda la protección de la estructura mediante un revestimiento para evitar daños por la humedad e insectos.

Palabras clave: Keisya, filtro percolador, UASB, PTAR, DQO, DBO, eficiencia, tratamiento aerobio, tratamiento anaerobio, sólidos suspendidos totales.

Ing. Paola Vidal Rivera

Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La contaminación del agua provocada por las actividades humanas es un reto que urge afrontar como país debido al aumento de la población y el crecimiento de las actividades industriales que conllevan mayor cantidad de residuos vertidos a los cuerpos de agua. Para solucionar esta problemática los estudiantes de ingeniería civil tenemos la obligación de implementar nuestro conocimiento y habilidades en la investigación de proyectos de manera integral que permitan prevenir y tratar los problemas que como sociedad enfrentamos.

El propósito de esta investigación consiste en analizar sistemas de tratamiento de aguas residuales con bajo costo de construcción, operación y mantenimiento que se puedan emplear en países en vías de desarrollo con el objetivo de enfrentar la contaminación que generan las aguas residuales. Por esto se pretende analizar la efectividad de la unidad de filtro biológico tipo Keisya mediante una planta piloto ubicada de forma experimental dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales de la Urbanización Santa Cecilia de Puriscal, sometiéndola ante diferentes condiciones de carga hidráulica variando el caudal de entrada a la unidad del Keisya, llevándolo a puntos críticos de funcionamiento para encontrar las condiciones en que su operación es óptima.

1.2 Justificación del problema

En Costa Rica el tratamiento de las aguas residuales es un desafío que debe ser atendido con urgencia por parte de las autoridades, ya que el vertido de estas aguas a los ríos sin un tratamiento previo, o con un tratamiento deficiente significa un impacto ambiental negativo que como país se tiene la obligación de afrontar.

Gracias a la consolidada red de distribución nacional se tiene que el acceso al agua potable es del 91% para la población costarricense, por el contrario, en el tratamiento de aguas residuales en marzo del 2019, solo un 15% de estas contaban con tratamiento de saneamiento a nivel nacional, lo que se justifica por la poca

infraestructura de alcantarillado y al presupuesto reducido destinado a esta área (García, 2018).

Como solución a este problema surge en el país el empleo de los tanques sépticos y zona de drenaje en la mayoría de los hogares donde el 70% de la población costarricense utiliza este sistema convirtiéndose en un aliado para el tratamiento de las aguas residuales cuando se emplea de forma correcta (García, 2018). Sin embargo, si los tanques sépticos de los hogares no se les está realizando el mantenimiento correcto, con limpiezas periódicas y verificando que no existan filtraciones de aguas residuales, estaría significando un impacto ambiental negativo. En Costa Rica las zonas más alejadas del área metropolitana presentan mayor cantidad de dificultades para atender la necesidad de tratar las aguas residuales, ya sea por la inexistencia de alcantarillado sanitario que conecte a una planta de tratamiento, o en muchos casos porque el presupuesto destinado para el mantenimiento de estos sistemas no es suficiente para garantizar la correcta operación y mantenimiento.

En el caso de la planta de tratamiento de la urbanización Santa Cecilia en Puriscal, esta forma parte de la Dirección de Recolección y Tratamiento de Aguas Residuales de la Gran Área Metropolitana, sin embargo, los problemas de financiamiento para la operación y el mantenimiento mencionados anteriormente son recurrentes en la planta, donde se requiere de la optimización de la operación del tratamiento mediante opciones eficientes de bajo costo operativo. Por ende, estos proyectos donde se realizan muestreos para determinar la eficiencia de la planta de tratamiento son de gran importancia, permitiendo también buscar soluciones sostenibles para poblaciones pequeñas.

1.3 Importancia

Un adecuado manejo de las aguas residuales va a generar un impacto positivo en el medio ambiente y por ende en la salud de las personas, por lo que es de suma importancia buscar opciones que permitan realizar un adecuado tratamiento de las aguas residuales a bajo costo de operación y mantenimiento para las zonas del país

cuyo acceso a sistemas de tratamiento de alto costo puede verse imposibilitado por motivos de infraestructura y presupuesto disponible.

Al analizar los sistemas de filtro biológico empleados en la planta de tratamiento de aguas residuales, se puede evaluar la eficiencia que estos tienen verificando que no exista presencia de contaminantes más allá de lo estipulado por el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, y que estas aguas puedan ser vertidas al río. Además, con los datos puntuales que se pueden obtener del estudio de estos sistemas se pueden hacer recomendaciones para su mejoramiento, así como el empleo de estos en plantas de tratamiento en todo el país debido a su bajo costo y al poco mantenimiento que requieren.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el rango de efectividad de la unidad de tratamiento tipo Keisya a escala ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización de Santa Cecilia en Puriscal.

1.4.2 Objetivos específicos

- Evaluar parámetros de eficiencia y operativos de un filtro biológico tipo Keisya ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Cecilia de Puriscal.
- Comparar los resultados obtenidos de eficiencia y capacidad de carga mediante el filtro biológico tipo Keisya con los parámetros dados por el filtro percolador existente en la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Plantear recomendaciones para el mejoramiento del sistema empleado en la planta de tratamiento de aguas residuales.

1.5 Delimitación del problema

1.5.1 Alcance

En este proyecto se realiza la evaluación del filtro biológico tipo Keisya a escala en sus condiciones actuales, el cual está ubicado en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de la urbanización Santa Cecilia de Puriscal como un

experimento de investigación, sin influir en el funcionamiento de la PTAR. El alcance del proyecto tomó en cuenta las siguientes condiciones:

- **Para la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal:**

- La PTAR se monitoreó desde el mes de septiembre del 2020 hasta el mes de febrero del 2021 abarcando un periodo de 5 meses.
- Se realizaron análisis puntuales de los datos de entrada de cada una de las partes que conforman el tren de tratamiento de la PTAR, así como de los datos de salida. Dentro de los parámetros incluidos para el análisis están: DQO, DBO, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, nutrientes como el fósforo, nitrito, nitrato y nitrógeno amoniacal, así como parámetros de control como pH, conductividad, sólidos disueltos totales y oxígeno disuelto.
- Se evaluó el cumplimiento de vertido de las aguas que salen de la PTAR, analizando el funcionamiento de cada uno de sus componentes para evaluar la influencia de estos en el agua de vertido, realizándose recomendaciones que permitan mejorar el funcionamiento de la PTAR. Además, se verifica el cumplimiento de los datos de vertido con el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

- **Para la unidad de tratamiento Keisya:**

- El Keisya utilizado corresponde a la unidad a escala instalada en sitio por proyectos previos, el cual fue revisado, reparado en los casos que fue necesario y acondicionado para la evaluación correspondiente.
- Se realizó la caracterización del modelo actual efectuando cambios en la operación a fin de ir evaluando el funcionamiento del mismo, esto mediante la determinación de los parámetros operativos y de diseño del sistema tales como tiempo de retención, cargas hidráulicas, cargas orgánicas y características geométricas.
- Solo se consideran los cambios en el sistema piloto del Keisya, las variaciones llevadas a cabo en la PTAR por parte del personal operativo no se consideran en el análisis.

- Para cada caudal se le dio un periodo de tiempo de una semana como mínimo para la estabilización del sistema, y un periodo de estudio de cada caudal en un rango de 3 a 6 semanas con una inspección semanal.
- Se comparan los datos de entrada al sistema Keisya con los datos de salida para analizar el comportamiento del sistema en la remoción de contaminantes.
- No se realizaron diseños finales de las recomendaciones.

1.5.2 Limitaciones

- Debido a la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales la cual se encuentra alejada del laboratorio de análisis y lugar de residencia del investigador, no se cuenta con la posibilidad de realizar mediciones continuas de los parámetros en estudio, por lo que se realizaron mediciones puntuales y aisladas, que estuvieron limitadas a las condiciones del momento.
- En el país no existen PTAR con el sistema KEISYA por lo que no se cuenta con la información disponible suficiente para comparar los resultados obtenidos durante el estudio.
- Se tiene dependencia de las condiciones operativas de la planta y de las condiciones de entrada de las aguas residuales, por lo que en muchas ocasiones se dependía de la cantidad de agua que entraba a la planta para poder tomar las muestras con cada uno de los caudales específicos, teniendo problemas de abastecimiento principalmente en la época seca y al tener los caudales de entrada bajos en el sistema del Keisya.
- Con respecto a la condición de emergencia nacional, se considera necesario mencionar que la PTAR de Santa Cecilia continuó operando en condiciones normales debido a que es una planta residencial que debe mantenerse en operación aún con las condiciones sanitarias presentes. Sin embargo, con la presencia de casos activos de COVID-19 si fue necesario realizar la suspensión de visitas.
- Asimismo, con la emergencia sanitaria presente, las visitas y el transporte se realizaron con el apoyo del personal del Instituto Costarricense de Acueductos

y Alcantarillados, el cual realiza visitas rutinarias para inspeccionar las condiciones de la PTAR.

- La planta piloto de tratamiento de aguas residuales tipo Keisya presentaba deterioros en la estructura debido al impacto de la humedad e insectos, por lo que se colocó un revestimiento para que la estructura sea sometida a este estudio. Sin embargo, se considera una limitación porque la estructura se encuentra previamente dañada y no en sus mejores condiciones.
- Por último, las pruebas de laboratorio se realizaron ajustándose a las condiciones operativas que se disponen. En el caso del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica se cuenta con el permiso de la ingeniera Paola Vidal y se siguieron las medidas estipuladas por el Ministerio de Salud, así como el cumplimiento de los horarios establecidos durante este periodo.

1.6 Antecedentes teóricos y prácticos

Para el desarrollo de este trabajo de graduación se utilizan como antecedentes los documentos de investigación que estudian el funcionamiento de la PTAR de la urbanización Santa Cecilia. Asimismo, se tomarán en cuenta los documentos en los cuales se analizan las unidades del tren de tratamiento y la experimentación realizada anteriormente con el filtro biológico tipo Keisya estudiado en este proyecto de graduación.

A continuación algunos de estos documentos:

- En el año 2019 se realiza un proyecto de graduación por parte de la estudiante Yancy Chacón Jiménez con el fin de evaluar la efectividad de las unidades de tratamiento UASB y filtro percolador empleados en la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal donde la investigación se delimitó a la revisión del diseño de los sistemas reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y filtro percolador para las condiciones de caudal que recibe la planta para reducir los valores de los parámetros medidos, corroborando de esta forma su eficiencia.

Algunos de los resultados obtenidos en este trabajo final de graduación son:

- El filtro percolador y el reactor UASB tienen eficiencias de remoción de DQO inferiores a las esperadas, aunque sí se presenta remoción de este parámetro.
 - El reactor UASB supera al filtro percolador en la remoción de DBO.
 - El filtro percolador contribuye a la remoción de nitrógeno amoniacal en el agua, así como la reducción de sólidos totales, volátiles y sedimentables.
 - Los valores obtenidos de sólidos totales a la salida del filtro y al vertido de la PTAR son muy similares, por lo que la remoción de estos por parte del sedimentador secundario no es significativa.
- Motoy Miyake (2019) presenta su estudio en la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal, denominado *Remoción de aguas residuales en Costa Rica con el Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB) y el sistema KEISYA*, incluyéndose la configuración y estabilización del filtro. En este documento se menciona que, en la primera parte del experimento, el agua tratada después de un ensayo continuo de 74 días, mostró una tasa de eliminación de DQO del 53%, la cual es menor a la tasa de eliminación de 78% del experimento realizado en Japón para aguas provenientes de la cocina. Asimismo, sin cambiar diseño ni caudales, la unidad de tratamiento del Keisya presenta en la segunda mitad del experimento una tasa de eliminación que supera el 70%.
Por último, Miyake (diseñador y ejecutor del proyecto) menciona en su estudio que es necesario realizar más experimentos en dicha planta porque se presentan problemas como la concentración de nutrientes en el agua, los factores de diseño al iniciar el método del KEISYA, la cantidad de escalones con los que esta estructura cuenta, el diseño de la pendiente de los escalones, los medios de purificación del agua, y la determinación de la capacidad de carga y caudal.
 - Solís (2018) en su proyecto de graduación denominado *Evaluación del modelo escala de biomasa suspendida por medio de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)* donde se evaluó la eficiencia del sistema DHS como un medio

de postratamiento de aguas residuales en un sistema anaeróbico de flujo ascendente (UASB) de la planta de tratamiento de Bosques de Santa Ana, considerándose este como un sistema de remoción simple, es decir de bajos costos de operación y mantenimiento.

El sistema DHS fue evaluado con dos caudales (3 L/min y 12 L/min) en dos puntos, el primero en el ingreso del agua al sistema y el segundo a la salida del agua del sistema.

La eficiencia del parámetro de DBO y DQO para el caudal de 3 L/min tiene mayor cumplimiento del reglamento de vertido. Además, el sistema es sensible a los cambios que se dan en el reactor UASB y funciona de forma más estable con periodos de retención hidráulica mayores como el de 5,5 horas en el caso de la investigación. Para mejorar la implementación de este sistema en el país, es necesario realizar estudios para un periodo de retención dentro del rango de 2 a 5,5 horas.

- Centeno, Rodríguez & Ugalde (2017) presentan su proyecto *Evaluación de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales ordinarias por medio de un filtro percolador con relleno de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un efluente de sedimentador primario*. En este documento se evaluó un filtro percolador con material de relleno de espuma de poliuretano para el postratamiento de un efluente sedimentador primario, con la presencia de un sedimentador secundario a la salida, monitoreándose por un año haciendo variar el tiempo de retención hidráulica y revisando las eficiencias de remoción de materia orgánica en términos de la DQO, DBO y los SST.

Con este estudio se determinó que el DHS tiene la capacidad de cumplir con los parámetros de DBO, DQO y SST al usarse como postratamiento de un sedimentador primario operando a una carga orgánica volumétrica entre 0,60 y 0,80 kgDBO/m³-d y una tasa de aplicación hidráulica superficial cercana a los 30 m³/m²-d.

Esta investigación permite validar la aplicación del sistema DHS para las condiciones de las aguas residuales de Costa Rica, recomendándose implementar

este sistema en una planta de tratamiento a escala plena. Además, se debe diseñar un sistema de distribución para el agua de alimentación del sistema y un sedimentador secundario adecuado.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta a los lectores del proyecto los conceptos generales y específicos que se tomaron en cuenta para la realización de la investigación.

2.1 Aguas residuales

Se entiende como aguas residuales, a estos líquidos que fueron utilizadas por el ser humano y que después de su uso quedan conformados por una fracción de agua y gran cantidad de componentes contaminantes que impiden usarla de esta forma para actividades humanas por lo que son vertidas en ríos (López & Martín, 2015). Explica la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) que las aguas residuales son: "Aguas que no tienen valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella" (AQUASTAT, s.f).

Después de utilizar el recurso hídrico, el ser humano se encarga de verterla a cuerpos de agua continentales o marinos, ya sea con tratamiento previo que permita controlar la contaminación sin un gran impacto a la naturaleza o sin tratamiento significando un impacto ambiental negativo.

Las aguas residuales se pueden dividir según su composición general en 3 tipos, los cuales se mencionan a continuación:

- Aguas residuales domésticas o urbanas: Estas son las aguas provenientes de las actividades domésticas desarrolladas por el ser humano, por ejemplo, el uso de lavatorios, sanitarios, duchas, lavado de ropa, entre otros. De este tipo de agua residual se pueden distinguir dos fuentes principales: Residuos domésticos y excreciones.
- Aguas residuales industriales o agrícolas: Son las aguas provenientes de actividades desarrolladas en la industria o en la agricultura, que presentan la característica de tener gran concentración de contaminantes (más que las domésticas) dependiendo de la actividad que se esté desarrollando.
- Aguas residuales mixtas: Estas son producto de la mezcla de las aguas urbanas con las industriales o agrícolas, donde estas últimas afectan la composición de las aguas urbanas.

Para realizar una gestión ambientalmente adecuada de las aguas residuales, en Costa Rica se utiliza el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, en el cual se dividen las aguas en dos tipos: ordinario y especial. Las aguas ordinarias son las domésticas o urbanas explicadas anteriormente, mientras que las aguas residuales especiales serían todas las demás que no sean ordinarias (Ministerio de Ambiente y Energía, 2007).

En Costa Rica es común que para el tratamiento individual de aguas residuales se utilicen los tanques sépticos y zona de drenaje, y como tratamiento colectivo las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) cuyo nombre puede variar de la región en estudio, conociéndose también como Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).

Con respecto a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales estas corresponden a una estructura que se sitúa al final de una red de alcantarillado sanitario y que permite recibir la materia prima correspondiente a aguas residuales ordinarias o especiales, obteniéndose luego de varios procesos de tratamiento el producto final perteneciente a agua depurada que cumple con los niveles de contaminación estipulados en la legislación, esto con el fin de que el medio receptor pueda asimilar la contaminación sin significar un gran impacto ambiental negativo (García, Pérez & Rancaño, 2012).

Cuando una PTAR recibe las aguas residuales, estas llevan a cabo una serie de procesos que pueden agruparse en cuatro líneas: línea de agua, de fangos, de gases y de aire (García, Pérez & Rancaño, 2012). Y cada una de estas líneas sigue una serie de etapas para su tratamiento desde la entrada hasta la salida. En el caso de la línea de agua, esta contempla las etapas de tratamiento de las aguas residuales las cuales son: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario. Lo anterior presenta todas las fases que se pueden presentar en una PTAR, sin embargo, dependiendo de factores como el clima, características del agua a tratar, el uso que se le da al agua depurada, y caudal de entrada y su estacionalidad, se pueden presentar todas las fases indicadas o no.

2.2 Procesos de tratamientos biológicos

Los procesos de tratamiento biológicos se encargan de controlar las condiciones del medio ambiente de los microorganismos para lograr que estos crezcan de manera óptima y con esto se logre la descomposición de los residuos.

Los procesos de tratamientos biológicos se pueden dividir en cinco grupos principales: procesos aerobios, procesos anaerobios, procesos anóxicos, procesos de lagunaje y procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados (Cajigas, 1995). En este documento se especificarán dos de los tratamientos más usados en Costa Rica, los aerobios y anaerobios.

El tratamiento de las aguas residuales en estos procesos se lleva a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, sistemas de cultivo fijo o combinados. El tratamiento de cultivos en suspensión es aquel en el que los microorganismos encargados de las conversión de la materia orgánica se mantienen suspendidos en el líquido; por el contrario, en los tratamientos de cultivo fijo o de película fija los microorganismos están fijos a un medio inerte diseñado para este objetivo, tales como: plásticos, esponjas, piedras, cerámicas y escorias.

Una de las principales aplicaciones de los procesos de tratamiento biológicos consiste en la eliminación de la DBO carbonosa donde la materia orgánica carbonosa del agua residual pasa un proceso de conversión biológica a tejido celular y componentes gaseosos, dándose la transformación del nitrógeno en amoníaco. Otra aplicación de estos tratamientos consiste en la nitrificación y desnitrificación, donde en la primera el amoníaco se transforma en nitrito y luego a nitrato, y en la desnitrificación el amoníaco se transforma en nitrógeno gas y otros productos gaseosos. Asimismo, se da la eliminación de nutrientes como el fósforo mediante procesos de tratamientos biológicos (Cajigas, 1995).

2.2.1 Tratamientos aerobios

Los tratamientos aerobios son aquellos que ocurren en presencia de oxígeno. En un proceso aerobio los microorganismos se alimentan de las sustancias biodegradables que están disueltas en las aguas residuales, transformándolas en dióxido de carbono, agua y oxígeno.

Cuadro 1. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento aerobio de aguas residuales

Tipo		Nombre común	Aplicación
Procesos aerobios	Cultivos en suspensión	Proceso de fangos activos	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
		Nitrificación de cultivos en suspensión	Nitrificación
		Lagunas aireadas	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
		Digestión aerobia	Estabilización y eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Cultivo fijo	Filtros percoladores	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
		Filtros de desbaste	Eliminación de la DBO carbonosa
		Sistemas biológicos rotativos de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
		Reactores de lecho de compacto	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)
	Procesos combinados	Biofiltros activados	Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)

Fuente: Cajigas, 1995.

2.2.2 Tratamientos anaerobios

Los tratamiento anaerobios son aquellos procesos biológicos que ocurren en ausencia de oxígeno. En estos las bacterias transforman la materia orgánica, la cual puede ser residuos sólidos orgánicos o aguas residuales de industria con residuos orgánicos, y la transforma en biogás (metano y dióxido de carbono).

El proceso anaerobio tiende a realizarse en reactores y se destaca por sus beneficios ambientales y económicos, ya que se puede utilizar el biogás generado y transformarlo en electricidad. Asimismo, se genera un lodo estabilizado producto del proceso de digestión que puede ser utilizado para fortalecer los suelos que carecen de materia orgánica (Chamy et al, s.f).

Cuadro 2. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento anaerobio de aguas residuales

Tipo		Nombre común	Aplicación
Procesos anaerobios	Cultivos en suspensión	Digestión anaerobia	Estabilización y eliminación de la DBO carbonosa
		Proceso anaerobio de contacto	Eliminación de la DBO carbonosa
		Manto de fango anaerobio de flujo ascendente	Eliminación de la DBO carbonosa
	Cultivo fijo	Filtros anaerobio	Eliminación de la DBO carbonosa y estabilización de residuos (desnitrificación)
		Lecho expandido	Eliminación de la DBO carbonosa y estabilización de residuos

Fuente: Cajigas, 1995.

2.3 Etapas para el tratamiento de aguas residuales

2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento corresponde a la primera fase de depuración de las aguas residuales donde se realizan un conjunto de operaciones físicas y mecánicas, en la mayoría de los casos antes de entrar a la planta de tratamiento, con el fin de controlar la entrada de sustancias u objetos que por su tamaño, densidad o características propias puedan ocasionar daños a los equipos de la PTAR o disminuir su capacidad de funcionamiento (García, Pérez & Rancaño, 2012).

En la etapa de pretratamiento se pueden encontrar las siguientes operaciones: Aliviadero de entrada y desvío (by-pass), pozo de gruesos, desbaste o rejillas, tamizado, desarenador, desengrasador, medición de caudal y tanque de homogenización.

2.3.2 Tratamiento primario

Esta etapa de tratamiento de las aguas residuales consiste en la aplicación de operaciones físicas para eliminar las partículas suspendidas que no fueron retiradas previamente en el pretratamiento, también se utiliza para el acondicionamiento de las aguas residuales para su descarga en los medios receptores o para pasar a un tratamiento secundario a través de una homogenización u neutralización (Ramalho, s.f).

Para el estudio del tratamiento primario en una PTAR, se presentan distintos procesos de tratamiento como los sedimentadores primarios convencionales, sedimentador digestor, tanque Imhoff, lagunas anaerobias y reactores anaerobios de mantos de lodos y flujo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB). Este último es considerado como tratamiento primario de alta eficiencia, debido a que su efectividad en el tratamiento de aguas residuales es superior a los tratamientos primarios convencionales de sedimentación, pero es inferior a los tratamientos secundarios convencionales.

2.3.2.1 Reactores anaerobios de mantos de lodos y flujo ascendente

En los reactores anaerobios de mantos de lodos y flujo ascendente (UASB) el agua residual entra al sistema por la parte inferior del reactor y conforme asciende esta entra en contacto con partículas formadas biológicamente conocidas como lodo microbiológico. En condiciones anaeróbicas se producen gases como el metano y dióxido de carbono que permiten que dentro del sistema se mantenga la circulación, colaborando así con la formación y mantenimiento de las partículas (Lorenzo & Obaya, 2006).

El gas producido en el manto de lodos se adhiere a las partículas biológicas, y este junto con el gas libre, ascienden a la parte superior del reactor, y aquí con la ayuda de deflectores desgasificadores se realiza la separación del gas y las partículas biológicas, donde el gas liberado y el gas libre son recogidos por una bóveda en la parte superior, y las partículas biológicas vuelven a caer hasta la superficie del manto de lodo. Luego, el líquido que contiene los sólidos residuales es conducido a una cámara de sedimentación donde se realiza la separación de estos y mediante un sistema de deflectores son llevados a la superficie del manto de lodo, conocido como separador trifásico.

La idea fundamental del sistema consiste en que el lodo anaerobio tenga buenas características de sedimentación, esto se logra si las condiciones físicas y químicas del proceso de floculación son favorables. Es importante lograr la formación de un lodo granulado, y esto depende de la temperatura, tipo de agua residual,

disponibilidad de nutrientes, pH y sedimentación por gravedad (Lorenzo & Obaya, 2006).

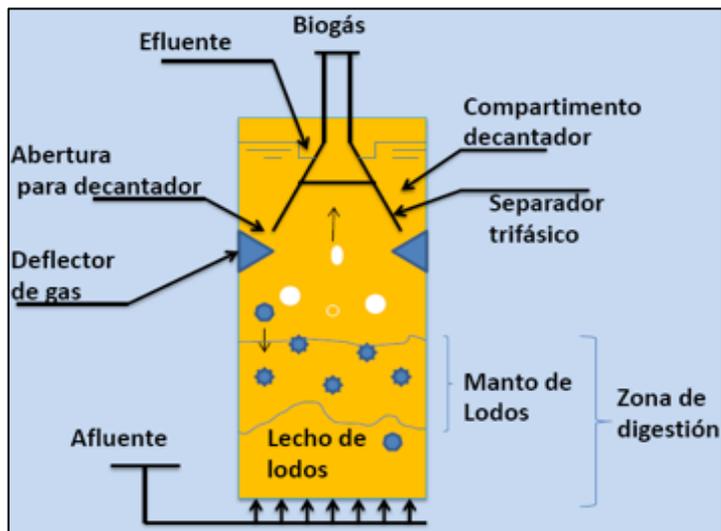


Figura 1. Reactor anaerobio de flujo ascendente
Fuente: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, 2018

2.3.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario tiene la función de eliminar los residuos contaminantes que el tratamiento primario no fue capaz de remover antes de llegar al tratamiento terciario o fase de desinfección en caso de que exista. En la mayoría de los casos este tipo de tratamiento incluye procesos biológicos realizados por unidades de tratamiento como filtro percolador de flujo descendente, reactor anaerobio de flujo ascendente, sedimentadores secundarios, entre muchos otras como el filtro biológico tipo Keisya de estudio en este proyecto.

2.3.3.1 Filtro percolador de flujo descendente

El sistema de filtro percolador de flujo descendente corresponde a una unidad de tratamiento biológico formada por un depósito, denominado lecho bacteriano, el cual está relleno de material grueso filtrante llamado medio soporte y que en la mayoría de los casos está formado por piedra de distintas formas o material sintético como el plástico sobre el cual se introducen las aguas residuales y funciona como soporte de los microorganismos que permiten la degradación de la materia orgánica (García, Pérez & Rancaño, 2012).

El proceso de tratamiento de las aguas residuales en un filtro percolador es muy similar al que se realiza naturalmente en un río cuando a este le son vertidos las aguas residuales. La diferencia radica en que al hacer uso de un filtro percolador, el oxígeno en este puede ser introducido natural o artificialmente mediante ventiladores, mientras que en los ríos se utiliza el oxígeno disuelto en las corrientes de agua, donde la cantidad de rocas y la pendiente del río contribuyen a mejorar la capacidad de oxigenación de este. Para entender mejor el procedimiento se explica a continuación cómo funciona un filtro percolador.

Las aguas residuales son introducidas en el lecho mediante brazos distribuidores fijos o móviles que funcionan como sistema de bombeo sobre los filtros, los cuales poseen en su parte inferior un sistema de drenaje que recoge el agua depurada. El lecho bacteriano permite que las bacterias aerobias y otros organismos se fijen en el medio de soporte formando una biopelícula, la cual se encarga de absorber la materia orgánica que es degradada y asimilada por los microorganismos aerobios (García, Pérez & Rancaño, 2012).

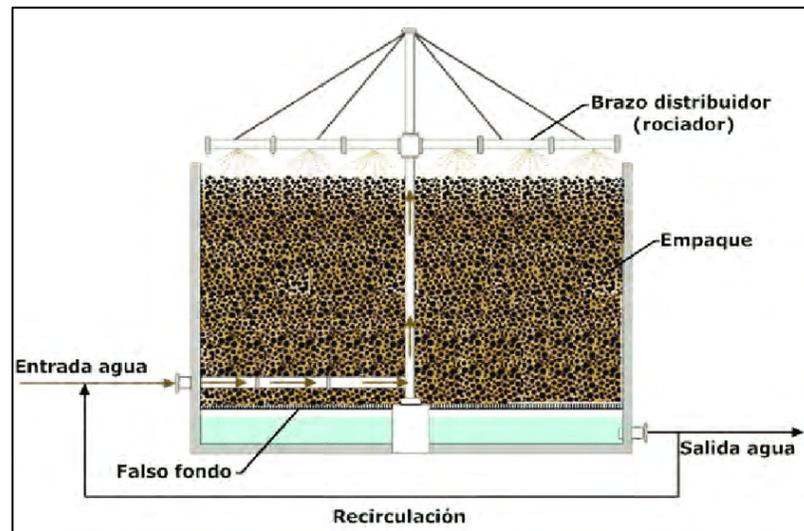


Figura 2. Esquema del filtro percolador de flujo descendente
Fuente: Noyola, Morgan & Güereca, 2013

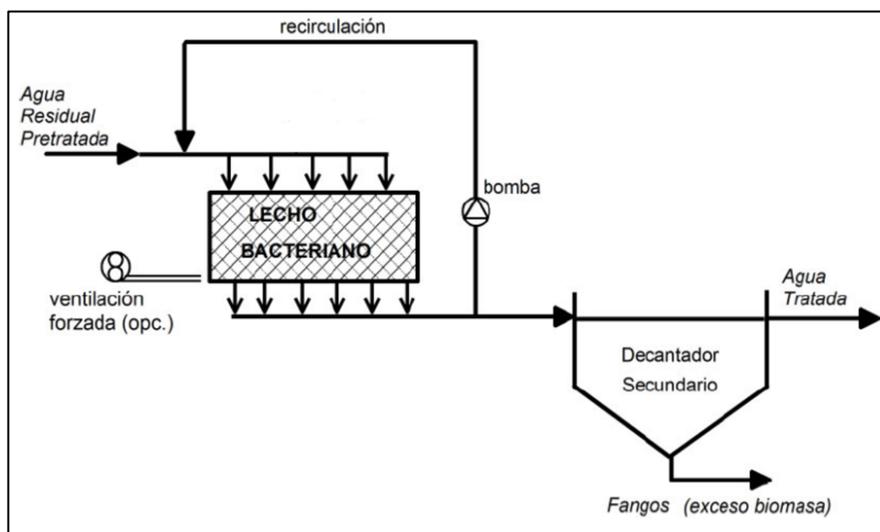


Figura 3. Esquema del funcionamiento del filtro percolador de flujo descendente
Fuente: GEDAR, s.f

Conforme aumenta el espesor de la biopelícula, el oxígeno se consume en las capas más superficiales, al igual que la materia orgánica que es degradada en estas capas, provocando que los microorganismos que están en las capas más internas no tengan la capacidad de adherirse a la superficie del medio y que la biopelícula se desprenda en el momento en el que el agua pasa, permitiendo que crezca una biopelícula nueva. (García, Pérez & Rancaño, 2012).

Esta biopelícula desprendida se elimina por sedimentación utilizando un decantador secundario que da origen a los fangos secundarios, los cuales son trasladados al decantador primario donde se sedimentan y son tratados junto a los fangos primarios.

Para que el filtro percolador funcione correctamente, las bacterias tienen tres necesidades fundamentales: oxígeno, alimento y medio húmedo. El oxígeno, como se mencionó anteriormente, puede conseguirse mediante aireación natural o artificial, la primera se logra si existe diferencia de temperatura entre el interior del lecho bacteriano y el ambiente exterior; la segunda se logra mediante ventiladores. El alimento y el medio húmedo lo aportan las aguas residuales que hay que purificar, por lo que el agua que sale del lecho bacteriano se recircula para que entre de nuevo en este, permitiendo siempre la entrada de agua al lecho lo cual es importante para que la biopelícula siempre esté mojada y además como el agua pasa varias veces

por el lecho, se le da la oportunidad a las bacterias de que se alimenten más de la contaminación y quede el agua mejor depurada.

2.3.3.2 Reactor de esponjas colgantes de flujo descendente DHS (Downflow Hanging Sponges)

El reactor de esponjas colgantes de flujo descendente, recibe las aguas residuales en la parte superior de su estructura de soporte, donde estas van pasando por sus diferentes niveles que contienen esponjas de poliuretano que permiten el crecimiento de biomasa, el cual se va dando con el paso constante de aguas residuales. La biomasa es la encargada de depurar las aguas empleando mecanismos físicos, biológicos y químicos.

Según Nurmiyanto y Ohashi (2019) se utiliza este material porque la alta porosidad que tiene asegura que la biomasa activa se retenga dentro y fuera de la esponja, lo que produce un aumento significativo en la concentración de biomasa y permite la permanencia del lodo por un periodo largo de aproximadamente 90 días. También se ha demostrado que la esponja tiene un largo poder de retención de agua en sus poros por lo que hay mayor retención hidráulica de las aguas tratadas, lo que permite que el sistema sea construido en un área pequeña reduciendo los costos de implementación. Asimismo, una de las ventajas del uso de esponjas de poliuretano es que estas son de bajo costo y disponibles en el mercado.

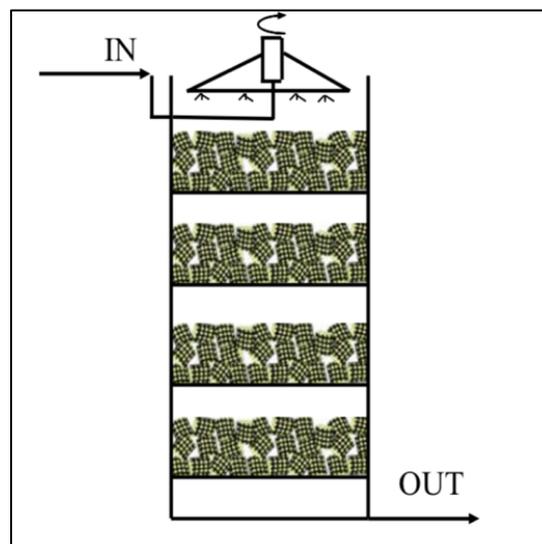


Figura 4. Estructura del reactor de esponjas colgantes de flujo descendente
Fuente: Miyake, 2020

2.3.3.3 Sistemas de cámaras de suelo inclinado SSCS (*Slanted Soil Chamber System KEISYA*)

El sistema de cámaras de suelo inclinado o también conocido como KEISYA, se encarga de utilizar las propiedades que tiene el suelo para realizar el tratamiento del agua por mecanismos biológicos.

Este sistema consiste en una estructura compuesta de cámaras en varios niveles los cuales se encuentran inclinados y tienen una huella con pequeñas dimensiones (aproximadamente 1,0 x 0,5 m) en la cual hay suelo con el fin de tratar las aguas que en su mayoría corresponden a aguas grises (Ushijima et al, 2013). Las paredes impermeables y la base inclinada del KEISYA permiten aumentar el tiempo de tratamiento de las aguas y el movimiento de estas de forma descendente, entrando por la parte superior de la estructura sin necesidad de una bomba o un tanque séptico, significando un bajo costo de operación por no utilizar o utilizar poca energía.

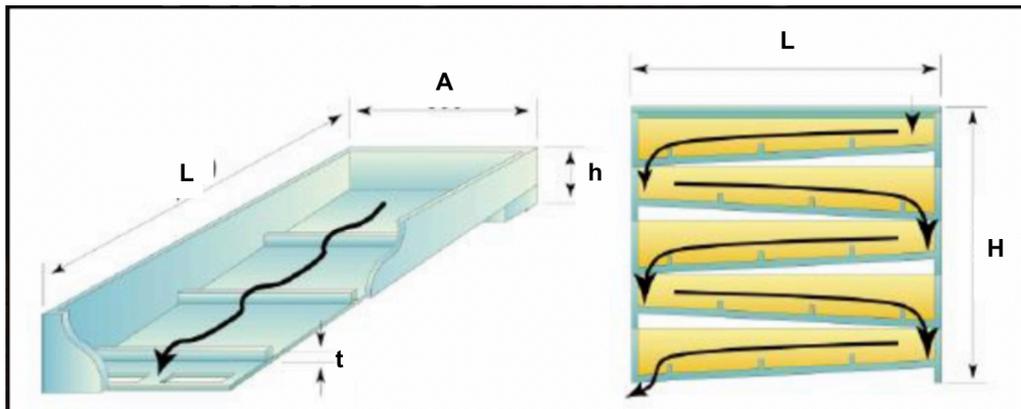


Figura 5. Sistema de cámaras de suelo inclinado

Fuente: Motoi Miyake, 2020

En caso de que se utilice una bomba para el funcionamiento del KEISYA, el costo de la bomba, de su instalación y operación son bajos comparados a los métodos convencionales de tratamiento de agua (Miyake, 2020) por lo que son sistemas empleados en zonas que cuentan con pocos recursos.

Los sistemas de tratamiento de aguas que emplean suelo, presentan dos problemas, el primero es que la purificación del agua es baja debido al atascamiento de los

materiales, y segundo se necesita una gran área para la construcción del sistema (Miyake, 2020).

2.3.4 Tratamiento terciario

Según García, Pérez & Rancaño (2012) el tratamiento terciario se divide en tres grupos según las características que se quieren obtener del agua residual:

- Aplicación de procesos físico químicos para reducir la cantidad de sólidos en suspensión, la turbidez y la contaminación orgánica con la que queda el agua después del tratamiento secundario. Algunos de los procesos aplicados serían coagulación-floculación, después decantación para finalizar con filtración sobre lecho de arena.
- Aplicación de productos para lograr la desinfección de las aguas después del tratamiento secundario. Algunos de esos productos son: cloro gas, hipoclorito, dióxido de cloro, ozono y rayos ultravioletas.
- Aplicación de los procesos de ósmosis inversa, electrodiálisis reversible e intercambio iónico para la reducción de sales en las aguas.

2.4 Parámetros de análisis para vertido de aguas residuales

Para garantizar la salud pública y el cuidado del medio ambiente al momento de realizar el vertido de aguas residuales a un cuerpo receptor o alcantarillado sanitario, es necesario analizar un conjunto de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos los cuales son especificados en el Reglamento de vertido y reúso de aguas residuales.

Para efectos de este proyecto, se realiza el análisis de los siguientes parámetros: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, potencial de hidrógeno, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, nutrientes (fósforo y nitrógeno), sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales y sólidos volátiles.

2.4.1 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno es uno de los parámetros de mayor importancia para medir la contaminación presente en las aguas residuales. Este parámetro representa la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar la materia orgánica que se encuentra en el agua.

Según Raffo y Ruiz (2014) la medición de la DBO tiene cuatro funciones:

- Define la calidad de las aguas residuales y superficiales.
- Establece los límites máximos permisibles.
- Permite la evaluación de las plantas de tratamiento de aguas residuales.
- Diseño de unidades de tratamiento biológicos.

Es común observar que se expresa la DBO como $DBO_{5,20}$, esto es porque en condiciones normales de laboratorio este parámetro se determina en un tiempo de 5 días a una temperatura de 20°C , expresándose en las unidades de mg/L.

2.4.2 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno representa la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente la materia orgánica que se encuentra en el agua residual. Es un parámetro que en poco tiempo permite determinar la calidad de las aguas residuales y superficiales ya que se realiza mediante una prueba de laboratorio con una duración aproximada de 2 horas. Este parámetro permite evaluar la eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales y establece los límites máximos permitidos para vertido a cuerpos de agua.

La DQO permite medir la materia orgánica e inorgánica que se encuentra presente en una muestra de agua proveniente de aguas residuales o superficiales, y que se puede oxidar químicamente mediante la acción de agentes oxidantes bajo condiciones específicas de temperatura, tiempo y acidez.

Según afirma la empresa *Hanna Instruments (s.f)*, para la medición de la DQO se utiliza el método colorimétrico de dicromato, donde el material de DQO se oxida con la presencia del ion dicromato y como resultado el cromo pasa de estado hexavalente a trivalente. Cambio que es percibido por el colorímetro y al terminar la reacción, arroja el valor de DQO en la muestra. Para esta prueba es necesario que la reacción se realice durante un periodo de 2 horas a temperaturas de $150^{\circ}\text{C} (\pm 2)$.

2.4.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno permite determinar la acidez o alcalinidad que se presenta en una disolución, en este caso aguas residuales. El pH permite determinar la concentración de iones positivos de hidrógeno en la muestra. Normalmente el pH se

mide en una escala del 1 al 14, donde el 1 representa una disolución muy ácida, el 14 representa el valor más alcalino y el 7 es el valor neutro.

Es recomendable que el valor de pH en una planta de tratamiento de aguas residuales esté en el rango de 5 a 9 ya que el tratamiento de estas por medio de procesos biológicos se desarrolla preferiblemente dentro de estos valores, asimismo, al realizar el vertido de estas aguas se debe controlar el pH para no afectar las condiciones naturales de los cuerpos de agua.

2.4.4 Temperatura (T)

La temperatura es un parámetro muy importante que influye en el desarrollo de vida en el agua por lo que si se presenta un cambio brusco de temperatura se aumenta la posibilidad de mortalidad de los organismos que se encuentran en el agua.

La temperatura de las aguas residuales tiende a ser superior a la temperatura del aire, lo cual es debido a que el calor específico del agua es mayor al del aire. Esta misma característica se presenta cuando se compara la temperatura del agua de suministro con las aguas residuales, donde estas últimas son mayores por la presencia de productos químicos industriales o el uso de agua caliente en los hogares, comercios o industrias. La temperatura media de las aguas residuales se encuentra entre 10°C y 21°C, asignándosele un valor representativo de 15,6°C. La temperatura óptima para propiciar el desarrollo de la actividad bacteriana es de 25°C a 30°C (CIDTA, s.f.).

2.4.5 Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto permite la respiración de los microorganismos y seres aerobios que se encuentran en el agua. El oxígeno presenta la característica de que es ligeramente soluble en el agua por lo que la cantidad real que hay de este gas y otros gases en el agua depende de la temperatura, solubilidad del gas, pureza del agua y la presión parcial del gas en la atmósfera (CIDTA, s.f.).

En un país como Costa Rica con estación seca muy intensa, es importante conocer que en estas temporadas al disminuir el caudal disminuye el oxígeno disuelto disponible. También se presenta la problemática de que al aumentar la temperatura

aumenta la velocidad de las reacciones bioquímicas por lo que la cantidad de oxígeno tiende a ser más crítica (CIDTA, s.f.).

Es importante mantener la concentración de oxígeno en el agua para no perturbar los procesos que se dan naturalmente en el cuerpo receptor afectando a los organismos a la hora del vertido, de igual forma la presencia de oxígeno disuelto disminuye los malos olores en las aguas residuales.

2.4.6 Conductividad eléctrica

La conductividad es un parámetro que permite conocer la facilidad con que la corriente eléctrica pasa a través del agua. Con este parámetro se pueden identificar las impurezas y sales disueltas que se encuentran en el agua ya que aumenta en presencia de estas, es por este motivo que las aguas residuales son mejores conductores eléctricos que el agua en su estado puro (Torres, s.f).

En aguas residuales urbanas la conductividad eléctrica tiene valores en el rango de 500 a 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, si se presentan valores mayores puede deberse a vertidos de aguas industriales o infiltraciones de aguas marinas en las costas (Pérez et al., 2013). Cuando el agua tiene valores de conductividad mayores a los 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se afecta el proceso biológico de depuración, produciéndose un desajuste en la colonia bacteriana, disminuyendo la densidad de la estructura flocular del fango activo y reduciendo la velocidad de sedimentación. Para corregir esto es necesario instalar sistemas de desalinización antes del sistema biológico (Pérez et al., 2013).

2.4.7 Nutrientes: Fósforo y Nitrógeno

- **Fósforo:** es un nutriente o bioestimulador que promueve el crecimiento de algas y organismos biológicos que al aumentar sin control la cantidad de estos en los cuerpos receptores son causantes de la disminución de la concentración de oxígeno disuelto provocando la muerte de otros organismos vivos, por lo que se considera necesario controlar la cantidad de fósforo que se vierte a las aguas superficiales debido a las aguas residuales domésticas e industriales. El fósforo es asimilado en forma de fosfatos, por lo que puede presentarse en una solución acuosa en forma de ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

Un 50-65% del fósforo de las aguas residuales urbanas proviene de materia fecal, de los alimentos vertidos y productos como el detergente, mientras que un 30-50% proviene de los productos de limpieza (Knobelsdorf, 2005).

- **Nitrógeno:** es un nutriente de gran importancia para el crecimiento biológico, por lo que al igual que el fósforo cuando exista crecimiento no controlado de algas en las aguas superficiales es necesario disminuir la cantidad de nitrógeno en las aguas residuales antes del vertido. Por el contrario, cuando el contenido de nitrógeno es insuficiente es necesario añadirlo para tratar el agua residual por medio de procesos biológicos (CIDTA, s.f.).

El nitrógeno se puede presentar en forma de amoníaco, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno de nitrito se presenta en pequeñas concentraciones (1 mg/L en aguas residuales y 0,1 mg/L en aguas superficiales) pero debe estudiarse y tener control de este parámetro ya que es de gran toxicidad para la fauna piscícola y especies acuáticas. El nitrógeno de nitrato representa la forma más oxidada del nitrógeno y se encuentra normalmente en valores entre el 0 y 20 mg/L, un valor de nitrato mayor a 45 mg/L puede ocasionar daños a la salud pública (CIDTA, s.f.).

En el caso del nitrógeno amoniacal, este se origina por la degradación del nitrógeno orgánico. Las actividades humanas generan que la cantidad de nitrógeno amoniacal vertido a los cuerpos de agua aumenten y alteren las condiciones normales del ecosistema, provocando la disminución de los niveles de oxígeno disuelto y por ende la muerte de los organismos vivos (Knobelsdorf, 2005).

2.4.8 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales se determinan haciendo pasar la muestra de agua residual por medio de un filtro, el cual puede ser un filtro de fibra de vidrio (tamaño nominal de poro de 1,2 micrómetros) o un filtro de membrana de policarbonato. Los resultados pueden variar dependiendo del material del filtro que se utilice. Luego de pasar la muestra por el filtro es necesario secarla a una temperatura de 100°C.

Los SST están compuestos por sólidos disueltos y sólidos coloidales. La fracción de sólidos disueltos están formados por moléculas orgánicas e inorgánicas, e iones en disolución, mientras que los sólidos coloidales son aquellas partículas de materia de tamaño entre 0,001 y 1 micrómetro, por lo que no se puede eliminar esta fracción mediante sedimentación y se necesita complementar este proceso con oxidación biológica o coagulación (CIDTA, s.f.).

2.4.9 Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

Los Sólidos Suspendidos Volátiles se obtienen al someter los SST a temperaturas de $550 \pm 50^{\circ}\text{C}$, obteniendo de esta forma la fracción inorgánica de la muestra mientras que la fracción orgánica se oxida y desaparece.

A esta temperatura, solo se produce la descomposición del carbonato de magnesio como representación de sales inorgánicas, al descomponerse en óxido de magnesio y dióxido de carbono a una temperatura de 350°C . Por otro lado, la sal inorgánica que más se encuentra en las aguas residuales corresponde al carbonato de calcio, la cual se descompone a una temperatura de 825°C (CIDTA, s.f.).

2.5 Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales

Uno de los principales objetivos del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales es el de controlar la contaminación de las aguas superficiales (ríos, lagos, humedales, quebradas, arroyos, lagunas, marismas, embalses, estuarios, manglares, entre otros.) que es provocada por el vertido de aguas residuales, con esto se protege el medio ambiente y la salud pública, y se reduce los costos en desinfección de aguas para el consumo humano.

En el Capítulo III del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales se especifican los límites permitidos para el vertido de aguas residuales a cuerpos receptores de agua por parte de los entes generadores, el cual se muestra en el siguiente cuadro.

Cuadro 3. Límites máximos permisibles para los parámetros universales de análisis obligatorio de aguas residuales de tipo ordinario vertidas a un cuerpo receptor

Parámetro	Límite máximo
DBO _{5,20} **	50 mg/L
DQO**	150 mg/L
Temperatura**	15°C ≤ T ≤ 40°C
Potencial de hidrógeno**	5 a 9
Sólidos suspendidos**	50 mg/L
Grasas/aceites	30 mg/L
Sólidos sedimentables	1 mL/L
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/L

Fuente: Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, 2007.

** Parámetros de estudio en este proyecto de investigación

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

En este capítulo se presenta la metodología del proyecto, la cual se encuentra formada por 4 etapas: investigación, caracterización de la PTAR y de la unidad de tratamiento Keisya (escala piloto), experimentación y análisis de resultados.

A continuación se muestra el esquema metodológico de la investigación realizada.

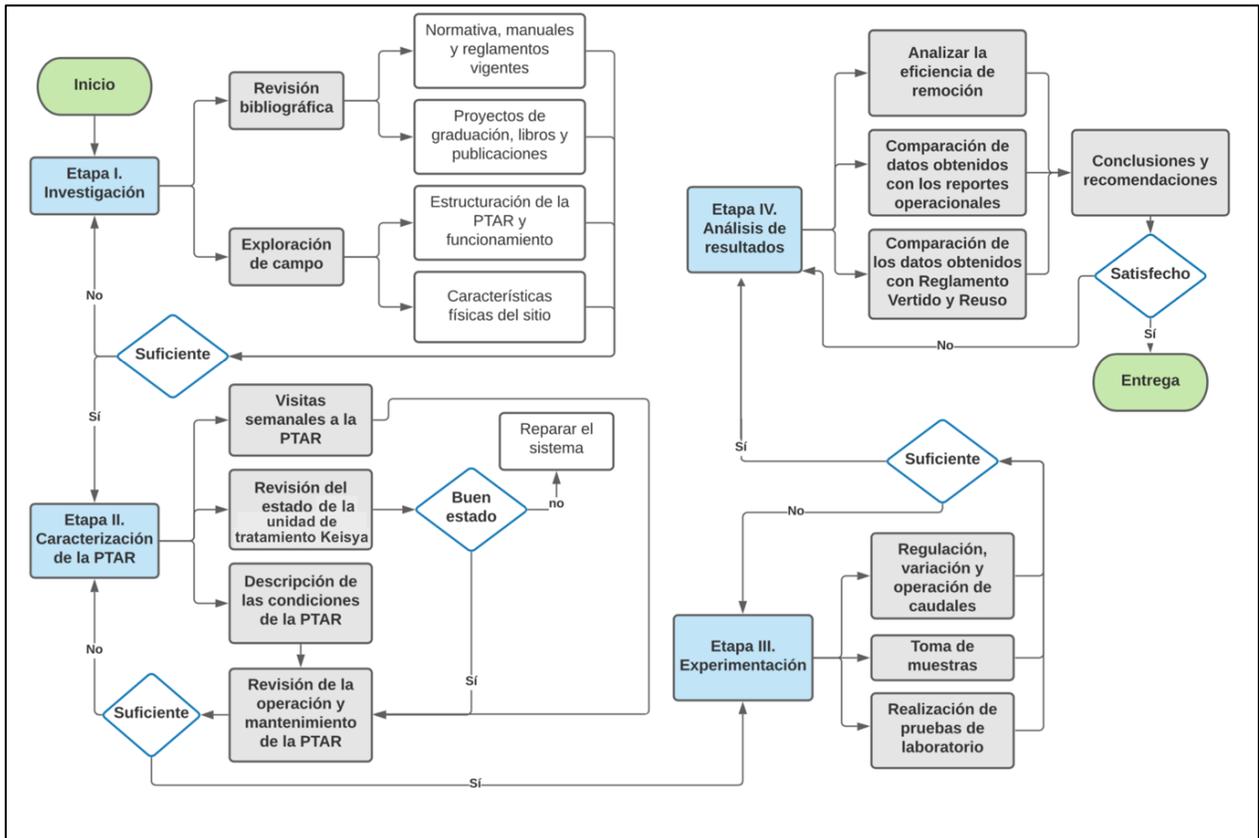


Figura 6. Esquema metodológico

3.1 Etapa I. Investigación

Para la realización del proyecto es de suma importancia contar con una base teórica fundamentada a partir de la investigación bibliográfica realizada, dentro de la cual se toman en cuenta proyectos de graduación anteriores, así como la normativa existente para el tratamiento de aguas residuales en el país e información de estudios disponibles sobre la tecnología Keisya y parámetros teóricos de operación y eficiencia.

Asimismo, en esta etapa se realiza la exploración del campo específicamente en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la urbanización de Santa Cecilia de

Puriscal, donde se conocen las distintas partes que la conforman, así como su funcionamiento y características físicas del sitio que puedan influir en los parámetros de estudio de este proyecto.

3.2 Etapa II. Caracterización de la PTAR y filtro biológico tipo Keisya

En esta etapa se realiza la caracterización de la PTAR y del filtro biológico tipo Keisya, para la cual fue necesario realizar visitas semanales. Primeramente se realiza una visita preliminar para observar la distribución del tren de tratamiento de la PTAR y conocer las características de los componentes existentes.

Se procede a describir las condiciones de los sistemas presentes en la PTAR, donde en este proceso es importante conocer el estado de la planta piloto correspondiente a una unidad de tratamiento tipo Keisya como elemento de experimentación dentro de la PTAR, el cual en los casos en que se encontraba en mal estado se debió reparar.

3.3 Etapa III. Experimentación

En esta etapa se procede a realizar la regulación, variación y operación de los caudales de estudio para lo cual es necesario la estabilización de la planta piloto tipo Keisya. Durante el proyecto se realiza el estudio de cuatro caudales distintos sobre dicha planta piloto tipo Keisya durante un periodo de 3 a 6 semanas para cada caudal, realizándose la toma de muestras cada semana por un periodo total de 5 meses. Las muestras fueron tomadas a la entrada de la PTAR, a la entrada y salida del filtro biológico tipo Keisya, a la salida del filtro percolador y a la salida de la PTAR. Luego de obtener la estabilización del filtro biológico tipo Keisya, se comienza con la toma de los muestreos puntuales de entrada y de salida en las distintas unidades de tratamiento de la PTAR como se mencionó anteriormente, realizándose un análisis completo de la eficiencia y la calidad de las aguas residuales tanto de la planta piloto tipo Keisya como de la PTAR.

Debido a su importancia y relevancia en el funcionamiento y evaluación de un sistema de tratamiento, para este proyecto de investigación se estudian los siguientes parámetros: DBO, DQO, pH, temperatura, caudal, sólidos suspendidos, nutrientes como fósforo y nitrógeno, conductividad y oxígeno disuelto.

Por último, las muestras de aguas residuales tomadas son sometidas a pruebas de laboratorio semanalmente o conforme se diera la disponibilidad del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica.

3.4 Etapa IV. Análisis de resultados

La última etapa corresponde al análisis de la eficiencia de la unidad de tratamiento de aguas residuales Keisya ubicada temporalmente en la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal. Se analizan las aguas residuales a la entrada y a la salida del Keisya, así como el funcionamiento, eficiencia, parámetros operativos y límites de las dos torres que conforman el sistema.

Con respecto a la PTAR, se identifica el cumplimiento de las aguas de vertido según lo estipulado en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas residuales. Asimismo, se contempla en el análisis la influencia de factores que hayan podido establecer un comportamiento distinto de la unidad del Keisya.

Por último, se realizan las conclusiones y recomendaciones que se consideren necesarias para el mejoramiento de la unidad de tratamiento del Keisya dentro de la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DEL FILTRO BIOLÓGICO TIPO KEISIA

El Capítulo 5 permite conocer las generalidades y condiciones en las que se realiza el estudio del filtro biológico Keisya el cual es un sistema de experimentación temporal ubicado dentro del tren de tratamiento de la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal, lo que quiere decir que no es un componente fijo dentro de la planta. A continuación se caracteriza el filtro biológico tipo Keisya y la planta piloto en estudio.

4.1 Generalidades del filtro biológico tipo Keisya

El filtro biológico tipo Keisya está conformado por un conjunto de cámaras inclinadas que se colocan apiladas como se puede observar en la Figura 7. Las dimensiones y materiales de construcción del filtro pueden cambiar dependiendo de las necesidades y recursos disponibles de la población.

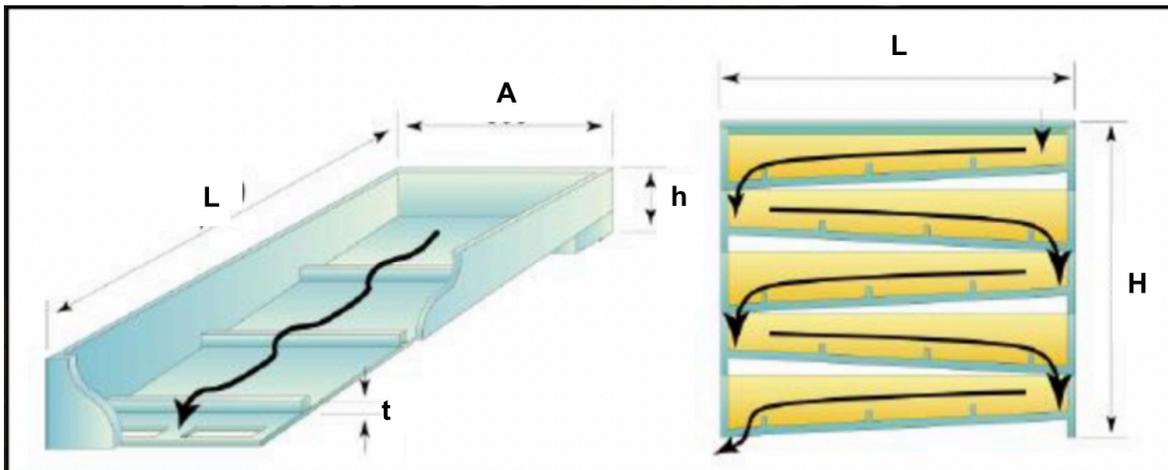


Figura 7. Estructura de las cámaras inclinadas
Fuente: Miyake, 2020

El agua residual entra al sistema desde la parte superior y empieza su proceso de purificación en condiciones aeróbicas conforme avanza por cada una de las cámaras inclinadas, las cuales están conformadas de materiales purificantes tales como esponjas de poliuretano, suelo, rocas porosas, entre otros. Estos materiales permiten la purificación del agua mediante mecanismos principalmente biológicos (también físicos y químicos) con el crecimiento de biomasa en el medio. Es recomendable que el nivel de agua que circula en las cámaras inclinadas no sea superior al material purificante, pero que sí tenga contacto con este para facilitar el crecimiento de la biomasa.

Miyake 2020 comenta algunas de las ventajas estructurales que presenta el filtro biológico tipo Keisya dentro de las cuales están: purificación extendida debido a las paredes impermeables entre las cámaras inclinadas consecutivas, compacidad con estructura laminar y no requiere el uso de energía debido a la inclinación de las cámaras.

4.2 Generalidades de la planta piloto tipo Keisya ubicada en la PTAR

El filtro biológico Keisya localizado en la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal corresponde a un sistema de experimentación que se adiciona a la planta para este estudio en el año 2019, conectado de forma paralela al filtro percolador ya que la entrada a ambos sistemas corresponde a la salida del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) y sus aguas residuales después de ser tratadas son vertidas al sedimentador secundario.

La planta piloto tipo Keisya está conformado por una estructura de madera que se encarga de sostener cajas de poliestireno de 955 mm de largo, 410 mm de ancho y 200 mm de alto. El sistema cuenta con dos torres de cajas de 10 niveles, para un total de 20 cajas. En cada nivel, las cajas se colocan con pendiente en dirección al ingreso de las aguas residuales.



Figura 8. Estructura del filtro biológico Keisya

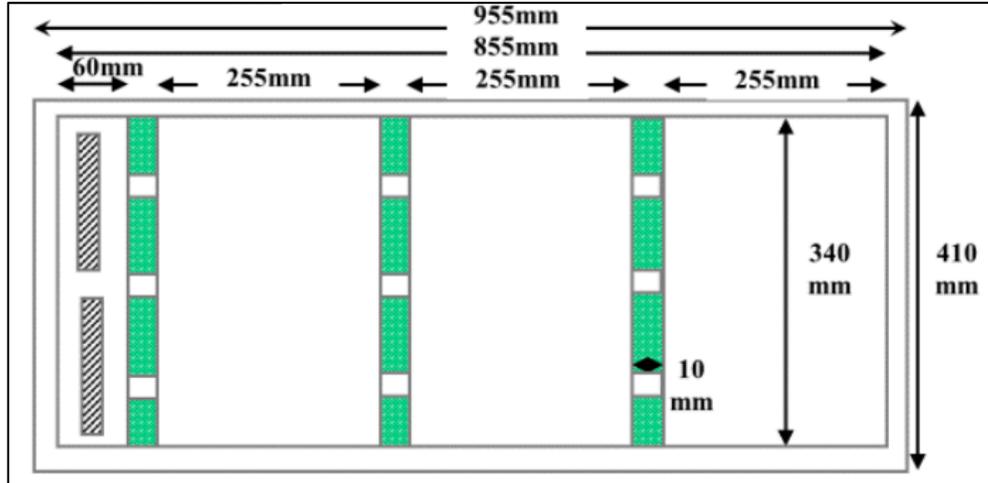


Figura 9. Vista superior de una caja del sistema
Fuente: Miyake, 2020

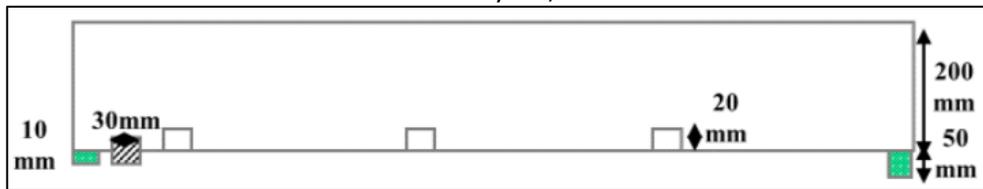


Figura 10. Vista lateral de una caja del sistema
Fuente: Miyake, 2020

Las aguas residuales entran al filtro por la parte superior del sistema por medio de dos tuberías localizadas en cada torre respectivamente y que pueden ser controlados por medio de válvulas para regular el caudal que ingresa.



Figura 11. Entrada y dirección del fluido en el sistema

Dentro de las cajas se ubica la placa de barrera contra el agua la cual fue elaborada con espuma de poliuretano. Asimismo, el medio encargado del crecimiento de biomasa para depurar las aguas residuales corresponde a esponjas de poliuretano recortadas en un cubo de 25 mm de lado cuyo costo es bajo y se encuentran disponibles en el país. Dentro de las ventajas del uso de esponjas de poliuretano es que debido a su alta porosidad permite que la biomasa activa se retenga fuera y dentro de la esponja por un periodo aproximado de 90 días, también permite retener mayor cantidad de agua por lo que el área de operación del sistema es pequeña.



Figura 12. Condición de las esponjas de poliuretano con biomasa

A la salida del filtro Keisya se tienen dos tuberías en cada una de las torres que permiten que el agua tratada en el sistema llegue al sedimentador secundario para continuar con su tratamiento, además permiten monitorear independientemente cada una de las torres.



Figura 13. Tuberías de salida del Keisya

Además, con respecto a la operación y mantenimiento de la unidad de tratamiento tipo Keisya algunas de las que realizan los funcionarios del AyA en la planta piloto tipo Keisya son las siguientes:

- Realizar una medición constante del caudal del sistema el cual en preferencia se espera que esté en un valor de 2 L/min.
- Eliminar obstrucciones en la tubería de entrada a la unidad de tratamiento cuando se presenten.
- Eliminar obstrucciones que se presenten en las cajas de poliestireno.
- Corregir fugas que se presenten por las paredes de la estructura o a la salida del efluente hacia el sedimentador secundario.

4.3 Condiciones de estudio del Keisya

En esta sección se especifican las condiciones en las cuales se realiza la evaluación del filtro biológico Keisya contemplando parámetros como el caudal, el tiempo de retención hidráulico, carga hidráulica volumétrica y superficial, y la carga orgánica.

4.3.1 Caudal

El ing. Jose Luis Ugalde Herra ejecutivo experto en el desarrollo e investigación de sistemas de recolección y tratamiento del AyA, menciona que el sistema Keisya funciona correctamente con un caudal en el rango de 1,5-2 L/min en cada torre ya que este ha sido el que se ha mantenido desde que se construyó demostrando que la planta piloto no se satura y da resultados buenos de remoción (Miyake, 2020).

Para efectos de este proyecto se realiza una intervención al caudal variándolo de los valores de 1, 2, 3 y 4 L/min en cada torre con una duración de mínimo tres semanas de cada caudal para determinar los puntos críticos de funcionamiento del sistema.

El caudal de 1 L/min en cada torre contempla los últimos muestreos realizados desde el 25 de enero hasta el 15 de febrero del 2021. Con todos los caudales, pero específicamente con el caudal de 1 L/min en cada torre, la presencia de obstrucciones en las tuberías y el aumento o disminución repentina en el caudal de entrada en la PTAR provocó que el mantener un caudal estable de estudio se dificultara, por lo que se requirió la ayuda de los operarios para ajustar caudal.

Con respecto al caudal de 2 L/min en cada torre, este fue el primer caudal de estudio ajustado por medio del método volumétrico y se esperó una semana de estabilización para una duración de seis semanas de muestreos en este caudal, abarcando desde el 3 de septiembre hasta el 13 de octubre del 2020. Con este caudal el sistema presenta las mejores condiciones donde las obstrucciones son esporádicas y el sistema no se satura.

Los muestreos realizados con el caudal de 3 L/min tuvieron una duración de cuatro semanas abarcando el periodo del 7 de diciembre del 2020 hasta el 18 de enero del 2021. Este caudal presentó una pequeña saturación del sistema y mayor cantidad de obstrucciones.

Por último, el caudal de 4 L/min abarcó tres semanas de muestreos desde el 19 de octubre hasta el 2 de noviembre del 2020. En este caudal el Keisya presentó problemas de funcionamiento, tales como:

- Saturación del sistema a pocos minutos de ajustar el caudal en 4 L/min incrementando las fugas y derrames de agua en las paredes de la estructura.
- Disminución drástica del caudal de entrada al filtro percolador, esto debido a que la tubería de salida del reactor UASB está conectada primero al sistema Keisya para luego llegar al filtro percolador, por lo que al aumentarse el caudal de entrada en el Keisya junto con el factor de que en estación seca se disminuye el caudal de entrada a la PTAR, impidió el correcto funcionamiento del filtro percolador.



Figura 14. Conexión del UASB al Keisya y filtro percolador

Dichos problemas fueron registrados por los operarios de la PTAR, por lo que junto con el ing. Jose Luis Ugalde Herra y el operario del AyA Yeram Loría Torres se toma la decisión de disminuir el caudal a 3 L/min en el cual el sistema funciona correctamente sin los problemas de saturación y derrames.

4.3.2 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica corresponde al tiempo promedio en que el agua residual tarda desde que entra y sale del sistema, es decir el tiempo de permanencia del líquido en la estructura sometido a tratamiento. El TRH permite el desarrollo de biopelícula en el medio de soporte del Keisya logrando el crecimiento de bacterias encargadas del tratamiento del agua residual.

La ecuación que permite determinar el tiempo de retención hidráulica es la siguiente:

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

Donde:

TRH = Tiempo de retención hidráulica (h)

V = Volumen total del sistema (m³)

Q = Caudal entrada a cada torre (m³/h)

El tiempo de retención hidráulica estimado se calcula para los cuatro caudales de estudio tomando en cuenta las dimensiones de cada una de las cajas, los cálculos se observan en los Anexos. Respecto a la altura, las cajas tienen una altura de 0,2 m, sin embargo se asume una altura de 0,1 m que es donde aproximadamente se encuentran las esponjas de poliuretano.

Cuadro 4. Dimensiones de las cajas de poliestireno

Parámetro	Dimensiones (m)
Altura total	0,200
Altura de biopelícula	0,100
Largo	0,885
Ancho	0,340

Cuadro 5. Tiempos de retención hidráulica estimados totales del Keisya

Caudal cada torre (L/min)	Área total superficial (m ²)	Volumen (m ³)	TRH (min)	TRH (h)
1,00	6,02	0,60	300,90	5,02
2,00			150,45	2,51
3,00			100,30	1,67
4,00			75,23	1,25

En los valores obtenidos anteriormente se observa que con un caudal de 4 L/min se tiene un menor tiempo de retención hidráulica, muy por debajo del caudal de 1 L/min, lo que permite garantizar que con caudales menores como el mencionado y el de 2 L/min se fomenta el desarrollo de biomasa en la planta piloto tipo Keisya.

4.3.3 Carga hidráulica volumétrica

Para el cálculo de la carga hidráulica volumétrica se utilizan los cuatro caudales de entrada estudiados en el filtro biológico tipo Keisya.

La ecuación utilizada para el cálculo de la CHV es:

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

Donde:

CHV: Carga volumétrica hidráulica

Q: Caudal de entrada a cada torre(L/min)

V: Volumen total del filtro biológico tipo Keisya (L)

TRH: Tiempo de retención hidráulica (min)

En el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para la carga hidráulica volumétrica del filtro biológico tipo Keisya y los cálculos se muestran en los Anexos.

Cuadro 6. Carga hidráulica volumétrica para la totalidad del filtro biológico tipo Keisya

Caudal en cada torre (L/min)	Volumen (m³)	TRH (h)	CHV (m³/m³*h)	CHV (m³/m³*día)
1,00	0,60	5,02	0,199	4,786
2,00		2,51	0,399	9,571
3,00		1,67	0,598	14,357
4,00		1,25	0,798	19,143

La carga hidráulica volumétrica representa el volumen de agua residual que entra a la planta piloto por unidad de volumen. Como se pudo observar anteriormente, el inverso del tiempo de retención hidráulica es la carga volumétrica, por lo que los caudales de 3 y 4 L/min en cada torre presentan los mayores valores de CHV, indicando que la unidad del Keisya con estos caudales recibe la mayor cantidad de volumen de agua residual limitando el tiempo de acción, estabilización y descomposición de la materia orgánica, contrario a los caudales de 1 y 2 L/min.

4.3.4 Carga hidráulica superficial

El cálculo de la carga hidráulica superficial se realiza empleando la siguiente ecuación (Ver Anexos):

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

Donde:

CHS: Carga hidráulica superficial

Q: Caudal de entrada a todo el sistema (L/min)

A: Área (m²)

Cuadro 7. Carga hidráulica superficial para toda la unidad de filtro biológico tipo Keisya

Caudal en cada torre (L/min)	Caudal en cada torre (m ³ /min)	Área total superficial (m ²)	CHS (m/día)
1,00	1,44	6,02	0,239
2,00	2,88		0,479
3,00	4,32		0,718
4,00	5,76		0,957

La carga hidráulica superficial representa el volumen de agua residual que entra a la unidad del Keisya por unidad de área. Al igual que la CHV, los caudales de entrada a la planta piloto con mayor CHS son los de 3 y 4 L/min en cada torre, lo que indican que con estos caudales recibe el mayor volumen de agua residual complicando el accionar de la biomasa con el residuo.

4.3.5 Carga orgánica volumétrica

La carga orgánica corresponde a la carga de trabajo que le toca procesar al sistema, en este caso el filtro biológico tipo Keisya. Por ende, para revisar la carga a la cual está trabajando el Keisya se necesita la concentración de sustrato en el afluente,

correspondiente al valor tomado de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) saliente del reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB).

El cálculo de la carga orgánica volumétrica se realiza empleando la siguiente ecuación:

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

Donde:

Q: Caudal de entrada a cada torre (m³/d)

S₀: Concentración de sustrato en el afluente (kg DBO/ m³*d)

V: Volumen total del filtro biológico tipo Keisya (m³)

COV: Carga orgánica volumétrica (kg DBO/m³*d)

En el Cuadro 8 se puede observar la carga orgánica volumétrica para el promedio de los resultados obtenidos de DBO con cada caudal, sin embargo, también se muestra el resultado de la COV para los resultados máximos y mínimos de DBO en el Cuadro 9.

Cuadro 8. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con el promedio de los valores de DBO

Caudal (m ³ /d)	S ₀ promedio (kg DBO/ m ³ *d)	Volumen (m ³)	COV promedio (kg DBO/m ³ *d)
1,440	0,094	0,600	0,451
2,880	0,060		0,574
4,320	0,059		0,854
5,760	0,040		0,774

Cuadro 9. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con los valores máximo y mínimo de DBO

Caudal (m ³ /d)	S ₀ máximo (kgDBO/m ³ *d)	S ₀ mínimo (kgDBO/m ³ *d)	Volumen (m ³)	COV máximo (kgDBO/m ³ *d)	COV mínimo (kgDBO/m ³ *d)
1,440	0,147	0,058	0,600	0,706	0,278
2,880	0,079	0,031		0,758	0,298
4,320	0,079	0,045		1,138	0,648
5,760	0,053	0,028		1,018	0,535

Cuadro 10. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con el promedio de los valores de DQO

Caudal	S₀ Salida UASB (promedio)	Volumen Keisya	COV (promedio)
m³/d	kg DQO/ m³	m³	kg DQO/m³*d
1,44	0,461	0,6	2,216
2,88	0,332		3,189
4,32	0,526		7,574
5,76	0,303		5,818

Cuadro 11. Carga orgánica volumétrica del filtro biológico Keisya con los valores máximo y mínimo de DQO

Caudal (m³/d)	S₀ máximo (kgDQO/m³*d)	S₀ mínimo (kgDQO/m³*d)	Volumen (m³)	COV máximo (kgDQO/m³*d)	COV mínimo (kgDQO/m³*d)
1,440	0,681	0,377	0,600	3,269	1,810
2,880	0,446	0,249		4,282	2,390
4,320	0,820	0,400		11,808	5,760
5,760	0,344	0,240		6,605	4,608

La carga orgánica volumétrica representa el volumen de agua residual que entra a la planta piloto por unidad de volumen, contemplando la concentración de sustrato en el afluente, específicamente DBO y DQO para este proyecto de graduación.

En los resultados mostrados se puede observar la carga orgánica volumétrica para los valores promedio de DBO y DQO a la salida del UASB que corresponde a la entrada a la planta piloto tipo Keisya. Asimismo, de esos valores obtenidos se tomó el resultado mínimo y máximo, y se calculó la carga orgánica volumétrica para observar algún comportamiento singular. Dicho esto, al momento de calcular la carga orgánica volumétrica con el máximo valor DQO para el caudal de 3 L/min en cada torre, se presenta un valor de 11,808 kgDQO/m³*d, el cual corresponde al máximo valor obtenido en los cálculos y que sobresale de la media de los datos, siendo un caso aislado donde la muestra fue afectada por factores externos por ejemplo el ingreso a la PTAR de altas concentraciones de DQO que el UASB no fue capaz de remover.

Tanto para el DQO como para el DBO, la mayor carga orgánica volumétrica lo presenta el caudal de 3 L/min en cada torre, lo que quiere decir que con este caudal el sistema debe procesar mayor cantidad de trabajo para el tratamiento de las aguas residuales. Caso contrario sucede con el caudal de 1 L/min en cada torre, el cual presenta el menor valor de carga orgánica volumétrica.

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA URBANIZACIÓN SANTA CECILIA DE PURISCAL

En este capítulo se realiza la caracterización de la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Santa Cecilia de Puriscal, contemplando primero la descripción general del sitio como la ubicación, topografía y condiciones climáticas. Luego, se comentan generalidades del diseño y componentes de la PTAR, y por último las condiciones de operación y mantenimiento de esta.

5.1 Descripción del sitio

5.1.1 Ubicación

La planta de tratamiento de aguas residuales se encuentra ubicada en el cantón de Puriscal que corresponde al cuarto cantón de la provincia de San José, el cual está constituido por 9 distritos con una población de 33 004 habitantes (INEC, 2011). La PTAR está ubicada en el distrito central Santiago que tiene una extensión de 34,6 km² (Inder, 2014), localizada específicamente en la urbanización Santa Cecilia.

La PTAR se encuentra en un terreno de 2 423,99 m² que colinda al norte con calle pública, al este con un lote baldío, al oeste con viviendas y al sur con el río Chuba en el cual se hace el vertido de las aguas tratadas en las instalaciones. También cuenta con dos accesos, el principal ubicado al norte mediante una vereda y el secundario ubicado al sur y es utilizado como calle pública aunque forma parte del terreno de la PTAR según el plano de catastro.

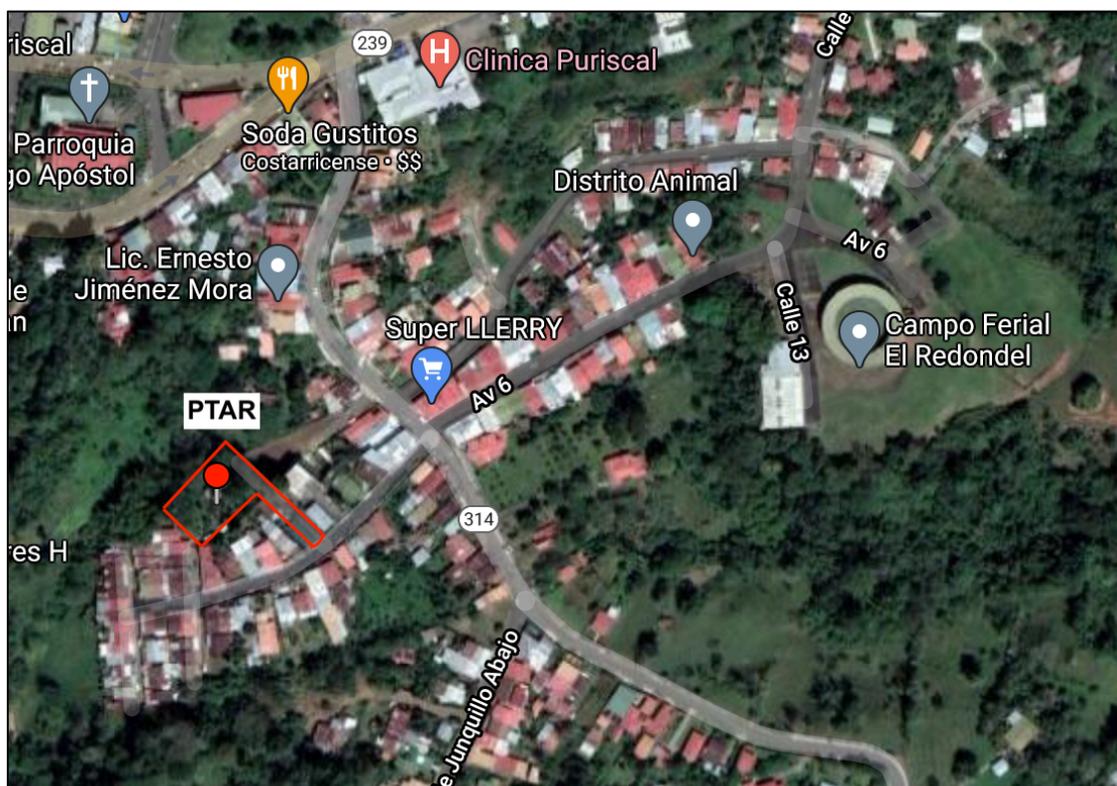


Figura 15. Ubicación de la PTAR en estudio
Fuente: Google Earth

5.1.2 Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas del sitio de estudio pueden llegar a afectar el sistema de operación de la PTAR, así como los resultados que se obtienen de las muestras tomadas. A continuación se mencionan algunos parámetros climáticos de Santiago de Puriscal que se consideran relevantes para este proyecto.

Esta información fue tomada de la página web Weather Spark cuya fuente de información es un análisis estadístico de informes climatológicos históricos por hora y reconstrucciones de modelos del 1 de enero de 1980 al 31 de diciembre del 2016.

- **Temperatura:** la temperatura templada abarca desde el 21 de febrero hasta el 25 de abril con una temperatura máxima promedio mayor a los 28°C. La temperatura fría abarca desde el 9 de septiembre hasta el 2 de diciembre con una temperatura promedio diaria menor a los 26°C (Weather Spark, s.f).

En la Figura 16 se puede observar la temperatura máxima (línea roja) y la temperatura mínima (línea azul) con las bandas de los percentiles 25° a 75° y 10° a 90°. Las líneas punteadas en el gráfico son las temperaturas promedio.

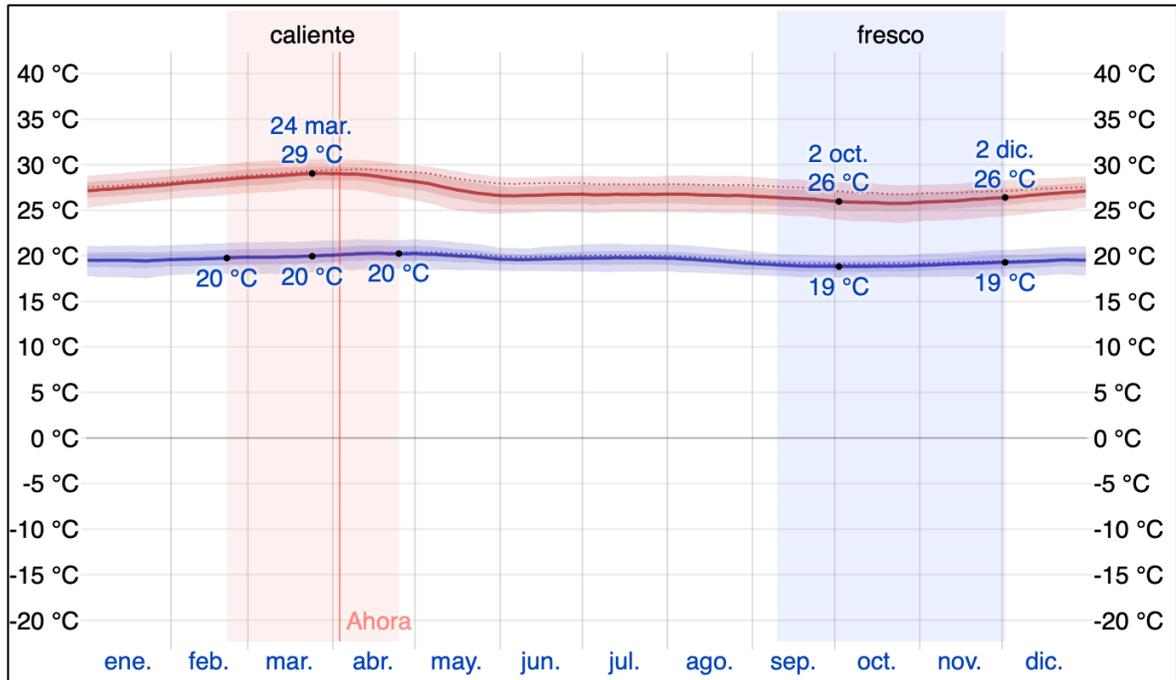


Figura 16. Temperaturas máximas y mínimas promedio
Fuente: Weather Spark, s.f

Con respecto a la temperatura del agua de las fuentes superficiales, esta se encuentra más caliente durante los meses de marzo, abril y mayo con una temperatura promedio mayor a los 29°C. Se presentan las menores temperaturas en los meses de octubre, noviembre y diciembre con una temperatura promedio menor a los 28°C (Weather Spark, s.f).

En la Figura 17 se observa la temperatura diaria promedio del agua con una línea de color morado con las bandas de los percentiles 25° a 75° y 10° a 90°.

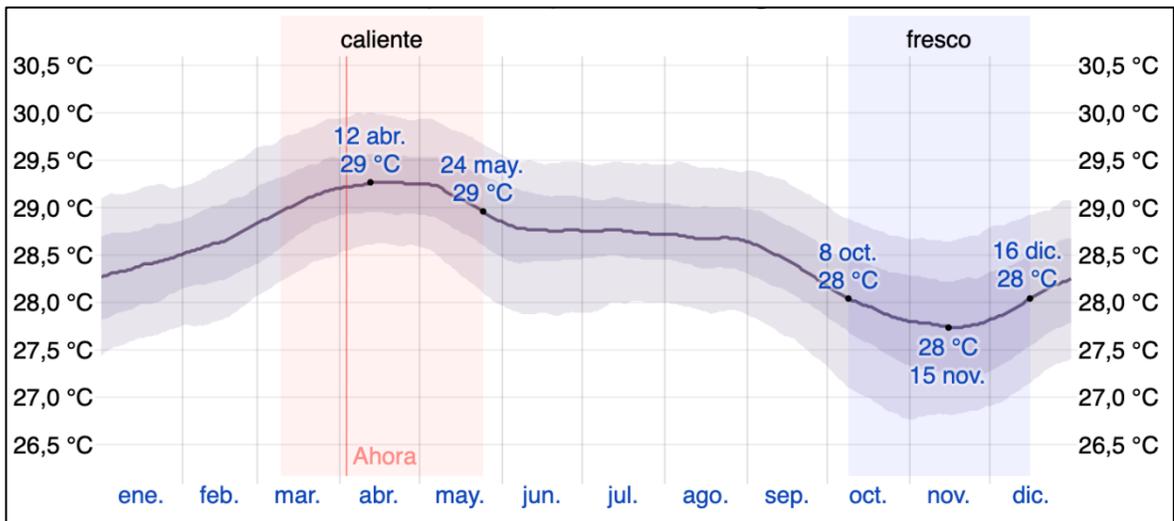


Figura 17. Temperaturas promedio del agua en Santiago Puriscal
Fuente: Weather Spark, s.f

- **Precipitaciones:** la temporada seca tiene una duración de 5,3 meses y abarca desde finales de noviembre hasta inicios de mayo. Por otro lado, la temporada lluviosa abarca desde inicios de mayo hasta finales de noviembre con una duración de 6,8 meses (Weather Spark, s.f).

La información anterior se aprecia mejor en la Figura 18.

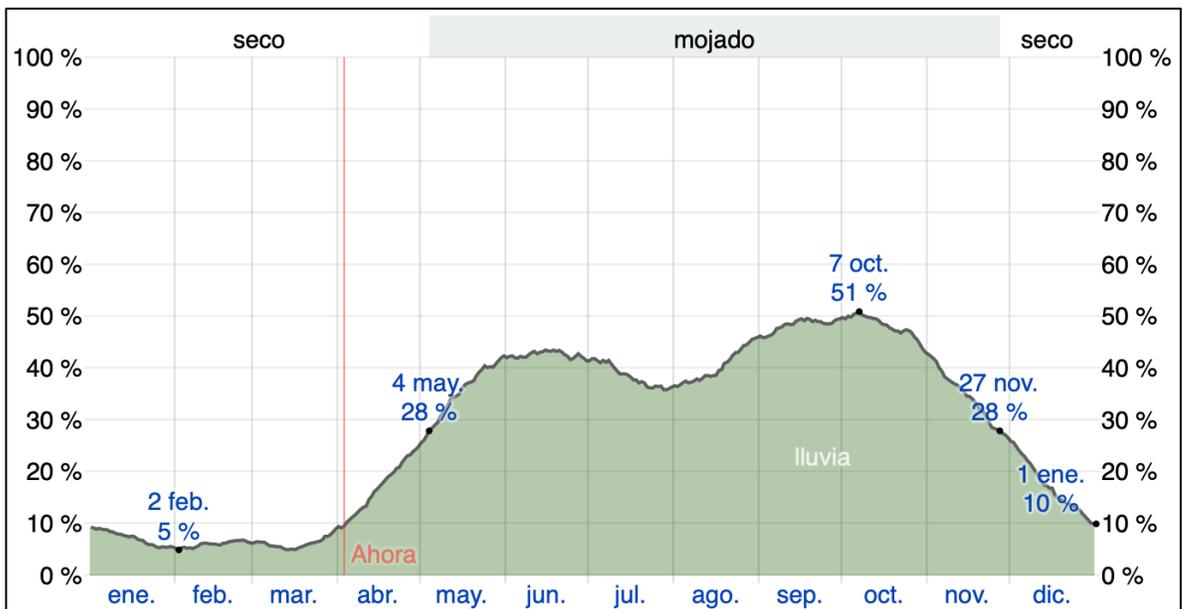


Figura 18. Probabilidad diaria de precipitación en Santiago de Puriscal
Fuente: Weather Spark, s.f

En la siguiente figura se muestra la precipitación de lluvia mensual en milímetros en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en estudio con las bandas percentiles del 25° a 75° y 10° a 90°.

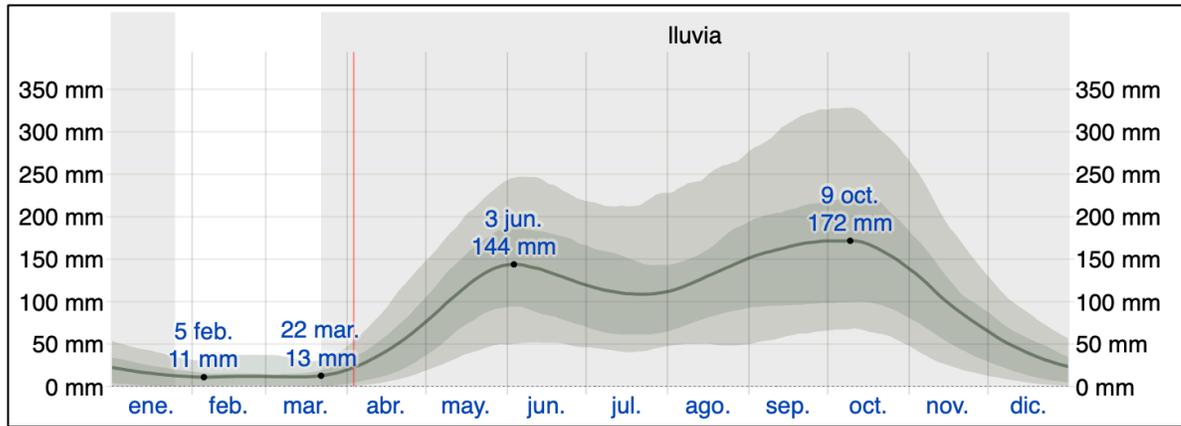


Figura 19. Precipitación de lluvia mensual promedio
Fuente: Weather Spark, s.f

- **Humedad:** el periodo más húmedo tiene una duración de 8,1 meses desde el 10 de abril hasta el 14 de diciembre. En la Figura 20 se observan los porcentajes de humedad con sus respectivos niveles de humedad en el año categorizado por el punto de rocío.

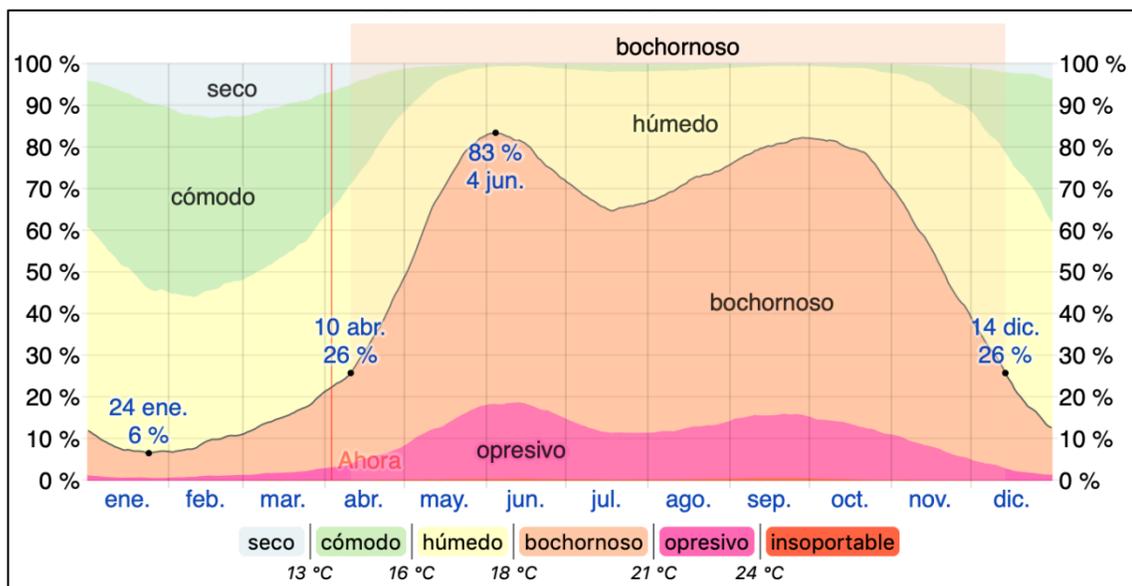


Figura 20. Porcentajes de humedad categorizado por el punto de rocío
Fuente: Weather Spark, s.f

5.1.3 Topografía

Santiago de Puriscal es una zona montañosa que tiene grandes variaciones de altitud, por ejemplo en un radio de 16 km puede llegar a tener variaciones de 1 952 m y en un radio de 3 km puede llegar a tener un cambio máximo de altitud de 564 m y una altitud promedio sobre el nivel del mar de 993 m (Weather Spark, s.f).

En la Figura 21 se observa que la zona de Santiago presenta elevaciones que van de los 528 m a los 2 338 m.

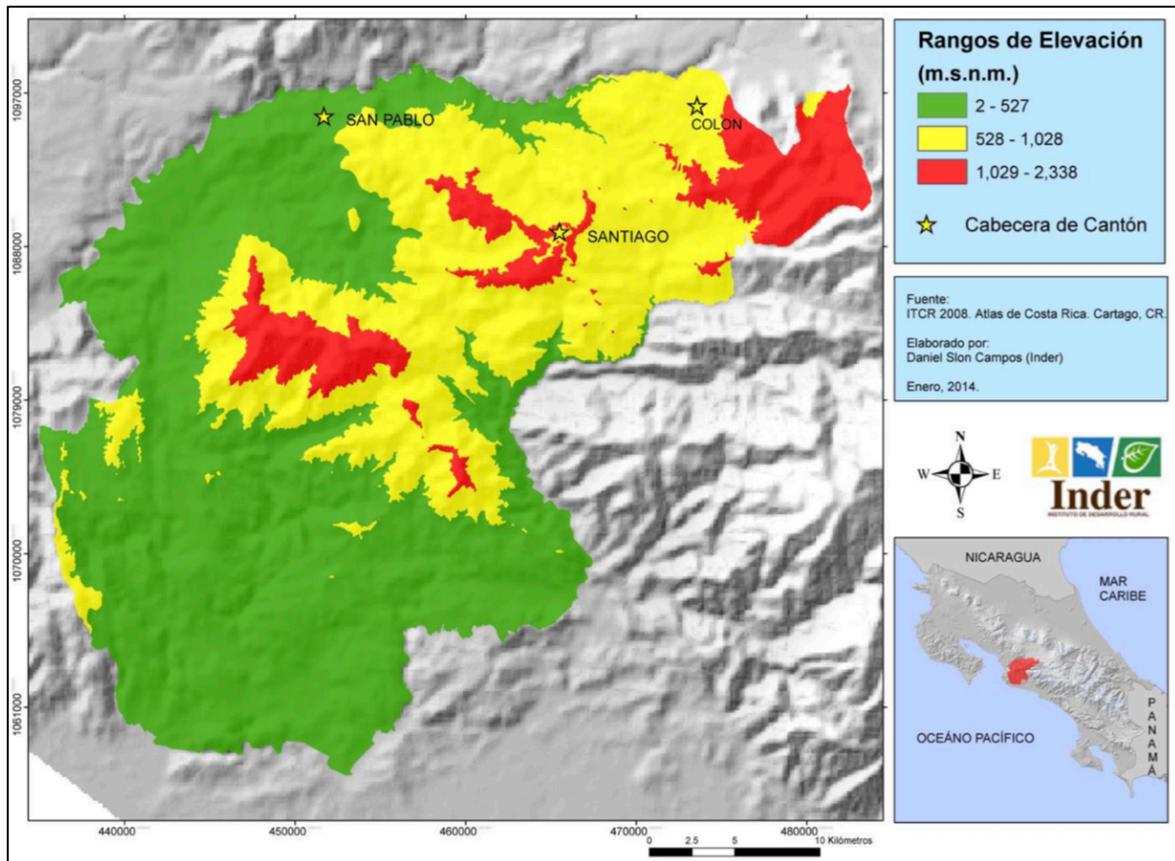


Figura 21. Rangos de elevación en el territorio
Fuente: Instituto de Desarrollo Rural, 2014

5.2 Generalidades de la PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización de Santa Cecilia de Puriscal es administrada por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y operada por la Dirección de Recolección y Tratamiento de la subgerencia de Gestión de Sistemas de la Gran Área Metropolitana. Construida en el año 1992 por el desarrollador de la urbanización y posteriormente trasladada al

AyA para su administración, operación y mantenimiento, diseñada para una caudal. La PTAR fue diseñada para un caudal de 0,75 L/s permite abastecer a una población de 160 habitantes para un total de 54 servicios conectados en la urbanización.

Los componentes de la PTAR son los siguientes: cámara de rejillas, vertedero, trampa de grasas, reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB), filtro percolador, sedimentador secundario, proceso de filtración con carbón activado, lechos de secado, digestor anaeróbico de lodos y estructura de desfogue.

En la Figura 22 se puede observar un diagrama de los componentes de la PTAR Santa Cecilia de Puriscal, y en la siguiente sección se explica el funcionamiento y el propósito que estos tienen dentro del tren de tratamiento.

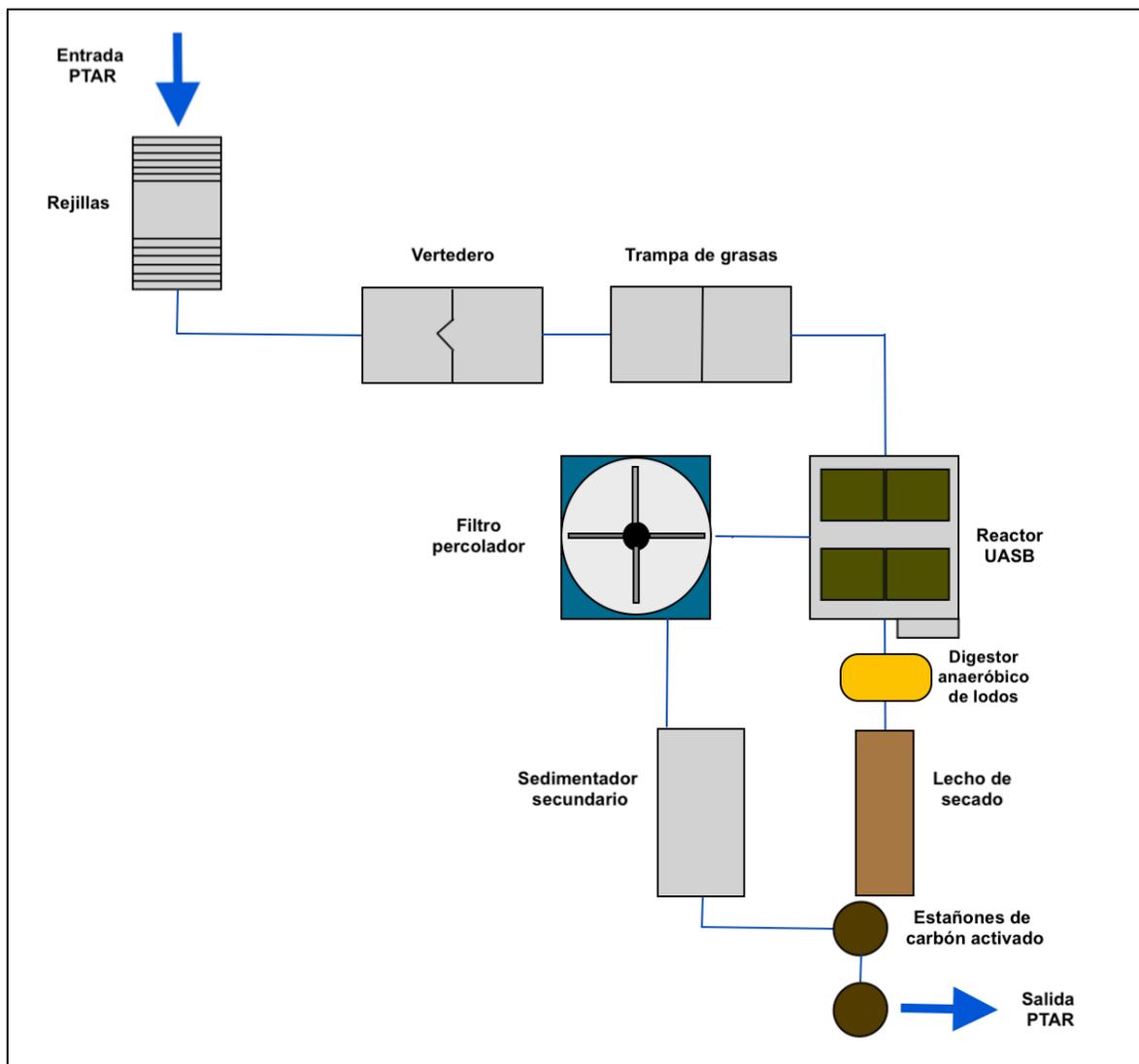


Figura 22. Diagrama de los componentes de la PTAR

5.2.1 Descripción de los componentes de la PTAR

5.2.1.1 Caja de rejillas

Las cajas de rejillas se encuentra ubicada en la entrada de la PTAR y tiene con función retener los sólidos gruesos (papeles, plásticos, ramas, cartones, etc) que llegan al sistema debido a la incorrecta disposición de estos en el alcantarillado sanitario y que pueden afectar el funcionamiento de los componentes de la PTAR. Estos sólidos son retenidos en dos rejillas ubicadas dentro de una caja de concreto, recogidos manualmente por los operarios y dispuestos en un lugar correcto que permita tratar estos materiales.



Figura 23. Caja de rejillas

5.2.1.2 Vertedero

La función del vertedero triangular consiste en realizar la medición de los caudales junto con un agujero de rebalse colocado a la capacidad máxima de caudal. En esta parte del vertedero se permite retener la mayor cantidad de residuos sedimentables con un tiempo de retención hidráulica mayor.

El vertedero ubicado en la PTAR de Santa Cecilia se encuentra dividido por una pantalla vertical que permite retener los sólidos flotantes y reducir la energía de entrada del flujo de agua, lo que permite mejorar las condiciones de la estructura para la realización de la medición del caudal mediante el vertedero.



Figura 24. Estructura del desarenador



Figura 25. Entrada de las aguas residuales al desarenador

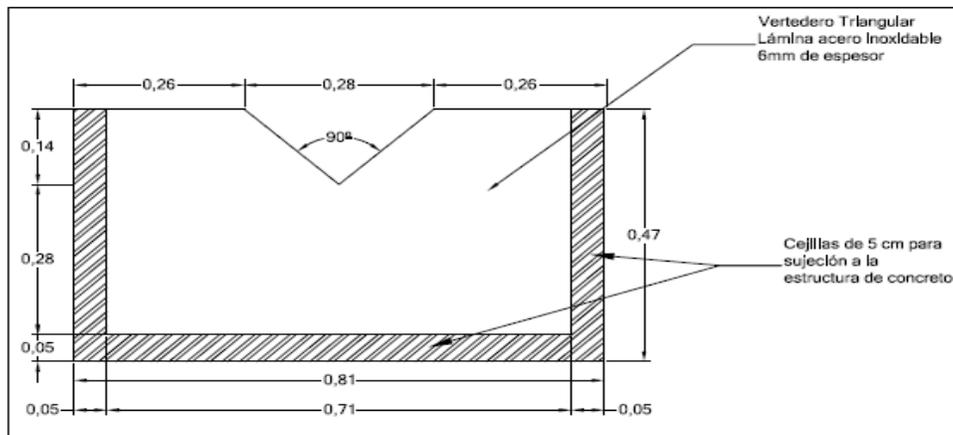


Figura 26. Dimensiones del vertedero triangular
Fuente: AyA, 2017

5.2.1.3 Trampa de grasas

Esta estructura permite retener las grasas provenientes de las aguas residuales ya que las grasas que ingresen a los sistemas de tratamiento afectan en gran magnitud la eficiencia de estos procesos, influyendo negativamente en los microorganismos encargados de oxidar la materia orgánica.



Figura 27. Trampa de grasas

5.2.1.4 Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

En esta estructura el agua residual ingresa por la parte inferior del sistema para iniciar su tratamiento al entrar en contacto con el lodo microbiológico el cual es digerido anteriormente de forma anaeróbica. Luego se realiza una unión de las partículas biológicas con el gas producido en el manto de lodos, los cuales ascienden a la parte superior del sistema.

En la cámara de sedimentación se realiza la separación de los sólidos pesados y la parte líquida, regresando la primera de estas a la cámara de digestión y el líquido con menor cantidad de sólidos es transportado por medio de una tubería al filtro percolador. Por último, el gas metano es retenido en una campana que lo dirige a una chimenea encargada de convertirlo en dióxido de carbono. El UASB de la PTAR Santa Cecilia cuenta con una válvula de purga de fondo y seis válvulas de inspección del nivel del manto del lodo.

El reactor tiene un largo y ancho teórico de 2,3 m y una profundidad de 4 m para un área total de 5,3 m y un volumen total aproximado de 21,2 m. Según Chacón

(2019) para un caudal de $1,96 \text{ m}^3/\text{h}$ el tiempo de retención hidráulica teórico es de 14,31 h, para un caudal de $0,28 \text{ m}^3/\text{h}$ es de 100,09 h y para un caudal de $1,12 \text{ m}^3/\text{h}$ es de 24,91 h.



Figura 28. Acceso al UASB



Figura 29. Vista superior del sistema UASB

5.2.1.5 Filtro percolador

El sistema de filtro percolador es una unidad de tratamiento biológico aerobio donde el agua residual entra por la parte superior del sistema mediante un brazo giratorio con orificios que se encarga de distribuir de la forma más equitativa el líquido sobre el sistema.

La estructura está formada por cuatro capas, la primera corresponde a esponjas tipo DHS y las otras tres capas son de grava de la misma granulometría. Al pasar el agua residual por estas capas, se desarrolla sobre las esponjas y la piedra una biopelícula que permite la degradación de la materia orgánica. El oxígeno necesario para esta degradación es introducido mediante aireación natural con la presencia de orificios rectangulares a lo largo de la estructura.

El filtro percolador tiene un ancho y largo según planos de 1,84 m, y una profundidad de 2,85 m. Según Chacón (2019), para un caudal de 1,96 m³/h el tiempo de retención hidráulica teórico es de 2,34 h, para un caudal de 0,28 m³/h es de 16,39 h y para un caudal de 1,12 m³/h es de 4,08 h.



Figura 30. Vista desde la parte superior del filtro percolador



Figura 31. Panel de control del filtro percolador

5.2.1.6 Sedimentador Secundario

Este sistema recibe las aguas residuales tratadas por el filtro percolador cumpliendo con la función de decantar los lodos provenientes de este filtro biológico, los cuales son recogidos por los operarios y dispuestos en los lechos de secado.

Con la instalación temporal de la unidad del Keisya, este sistema se encarga de recibir las aguas residuales de este sistema junto con las del filtro percolador.

El sedimentador secundario tiene un largo de 7 m, un ancho de 0,9 m y una profundidad de 2,7 m. En la siguiente figura se puede apreciar la estructura, con sus dimensiones y geometría.



Figura 32. Sedimentador secundario

5.2.1.7 Lechos de secado

Los lechos de secado permiten que los lodos estabilizados retirados de los procesos de tratamiento anteriores sean deshidratados por medio del sol y el viento para ser dispuestos de forma correcta. El área de cada unidad de lecho de secado en la PTAR es de 28,5 m².



Figura 33. Lechos de secado

5.2.1.8 Filtro de carbón activado

El filtro de carbón activo es el último proceso de depuración de las aguas residuales de la PTAR el cual fue instalado como una prueba piloto para analizar si contribuye al cumplimiento de vertido de las aguas residuales al cuerpo de agua.

Este sistema está conformado por tres estañones con carbón activado en su interior que funcionan como filtro que permite el paso de las partículas más limpias del agua residual.



Figura 34. Filtro de carbón activado



Figura 35. Interior del filtro de carbón activo

5.2.2 Información de diseño de la PTAR

En el Manual de Operación y Mantenimiento del Sistema de Tratamiento Santa Cecilia de Puriscal se especifica la información básica para el diseño de la planta de tratamiento contemplando los parámetros utilizados mostrados en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros de diseño de los sistemas de tratamiento de la PTAR

Parámetros de diseño		
Jornada de operación	12 horas diarias (lunes a sábado)	
Jornada de trabajo de la PTAR	24 horas/día, 365 días/año	
Volúmenes de diseño y capacidad de la PTAR	Caudal promedio diario	64,8 m ³ /día
	Caudal promedio horario	6,07 m ³ /h
Tipo de agua residual	Ordinaria	

Fuente: Badilla, 2012

En el manual mencionado anteriormente, también se indica la carga orgánica de diseño del sistema tomando en cuenta los análisis realizados en la PTAR por el

Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados lo cual se puede observar en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Concentraciones y carga orgánica de diseño de los sistemas de tratamiento

Concentraciones y carga orgánica de diseño		
Concentraciones para agua cruda	DBO	300 mg/L
	DQO	435 mg/L
	SST	250 mg/L
Cargas orgánicas totales para el caudal promedio diario	C org (DBO _{5,20})	19,44 kg DBO/día
	C org (DQO)	28,19 kg DQO/día
	C org (SST)	16,20 kg SST/día

Fuente: Badilla, 2012

5.3 Operación y mantenimiento de la PTAR

La planta de tratamiento de aguas residuales cuenta con labores de mantenimiento y operación estipuladas en el *Manual de Operación y Mantenimiento del Sistema de Tratamiento Santa Cecilia, Puriscal*.

En esta sección se mencionan algunas de las funciones de operación y mantenimiento realizadas por los dos operarios del AyA que se encuentran a cargo del manejo de la PTAR, para lo cual se puede observar el Cuadro 14.

Cuadro 14. Funciones de operación y mantenimiento realizadas en la PTAR y su frecuencia

Unidad de tratamiento	Funciones a realizar	Frecuencia
Caja de rejillas	Extracción de material retenido en las rejillas	Diario
	Inspección del funcionamiento para corregir daños	Mínimo semanalmente
Sedimentador primario	Purga de lodos primarios	Según SSVLM
	Limpieza de vertederos	Diario
Reactor UASB	Limpieza de la canaleta de entrada	Diario
	Inspección de la estructura	Periódicamente
Filtro percolador	Retrolavado	-
	Limpieza completa	-
Sedimentador secundario	Eliminar espumas y flotantes	Diario
	Limpieza de canaletas, pasarelas y vertederos	Diario
	Purga de los lodos secundarios	Según SSVLM
Biodigestor anaerobio de lodos	Limpieza del medio	Anual

Unidad de tratamiento	Funciones a realizar	Frecuencia
Lecho de secado de lodos	Preparación	Antes de cada uso
	Retiro de los lodos	Cuando estén secos, aproximadamente semanalmente
Estructuras metálicas	Inspección	Mensual
	Pintura anticorrosiva	Anual
Control operacional	Anotaciones en bitácora	Diario
	Mediciones de caudal, pH, sólidos sedimentables, oxígeno disuelto y temperatura	Diario
Regencia ambiental	Inspecciones sanitarias	Semanales
	Análisis de DBO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, pH, temperatura y grasas y aceites	Trimestral
	Reporte operacional al Ministerio de Salud	Trimestral

Fuente: Badilla, 2012

5.4 Datos históricos en la PTAR

5.4.1 Reportes operacionales históricos

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados brindó acceso a los dos reportes operacionales realizados en la planta de tratamiento de aguas residuales de Santa Cecilia de Puriscal en el año 2020 correspondientes al primer y segundo semestre.

5.4.1.1 Resultados de las mediciones por parte del ente generador

Los operarios de la PTAR realizan una serie de monitoreos de las condiciones de los sistemas para controlar y dar mantenimiento a estos, además con el fin de entregar los reportes operacionales de forma correcta para entrega de estos al Sistema Informático para el Registro de los Reportes Operacionales de Aguas residuales del Ministerio de Salud.

En el Cuadro 15 se muestran los resultados de las pruebas realizadas por los operarios en la planta durante el año 2020, específicamente en los meses de mayo y noviembre.

Cuadro 15. Estadística de monitoreo realizada por el ente generador

Fecha	Parámetro	Cantidad de veces	Promedio	Desvío Estándar	Mínimo	Máximo
Mayo 2020	pH	28	6,4	0,6	5,0	7,8
	Temperatura (°C)	28	24,4	3,1	20	32,7
	SSed (mL/L)	28	0,1	0,0	0,0	0,2
	Caudal (m ³ /día)	28	24	0,2	2,0	52,0
Noviembre 2020	pH	10	6,3	0,3	6,0	6,6
	Temperatura (°C)	10	25	1,7	22,5	28,5
	SSed (mL/L)	10	0,1	0,0	0,1	0,1
	Caudal (m ³ /día)	10	29	0,2	9,0	53,0

Fuente: AyA, 2020

4.4.1.2 Resultados de análisis físico-químicos y microbiológicos de laboratorio

Además de los monitoreos realizados por los operadores de la PTAR se realizan análisis de laboratorio al efluente del sistema de tratamiento verificando el cumplimiento del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales Decreto N° 33601-MINAE-S.

Cuadro 16. Resultados de análisis del Laboratorio Análisis San Martín de mayo 2020

Fecha	Parámetro	Resultado	Límite	Incertidumbre
Mayo 2020	DBO (mg/L)	25	50	2
	DQO (mg/L)	167 **	150	23
	pH	7,41	5-9	0,06
	Temperatura (°C)	24	15-40	1
	SST (mg/L)	15	50	1
	Ssed (mL/L/h)	0,1	1	ND
	Grasas y aceites (mg/L)	4	30	ND
	SAAM	5,6 **	5	0,7

Fuente: AyA, 2020

** Valores que sobrepasan el límite de vertido

Cuadro 17. Resultados de análisis del Laboratorio Nacional de Aguas de noviembre 2020

Fecha	Parámetro	Resultado	Límite	Incertidumbre
Noviembre 2020	DBO (mg/L)	32	50	2
	DQO (mg/L)	122	150	3,2
	pH	7,7	5-9	0,1
	Temperatura (°C)	23,1	15-40	0,5
	SST (mg/L)	12	50	3,6
	Ssed (mL/L/h)	0	1	0,1
	Grasas y aceites (mg/L)	4,8	30	0,5
	SAAM	2,1	5	0,28

Fuente: AyA, 2020

En estos cuadros anteriores se puede apreciar que el valor de DQO y SAAM para el primer semestre del 2020 realizado en el mes de mayo no cumplen con los límites de vertido, mientras que en el mes de noviembre si se da el cumplimiento de estos, lo cual puede deberse a la influencia de las precipitaciones que se infiltran en el alcantarillado sanitario durante la estación lluviosa.

5.4.2 Resultados del Laboratorio Nacional de Aguas

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados por medio del Laboratorio Nacional de Aguas realiza muestreos de control físico químico y microbiológico de la calidad de las aguas residuales en plantas de tratamiento. Los informes anuales de aguas residuales fueron otorgados por esta entidad y estos presentan las condiciones en la entrada y de vertido de las aguas residuales de la PTAR Santa Cecilia de Puriscal durante los años 2019 y 2020.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los informes anuales, contemplando los parámetros de: demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos totales, sólidos suspendidos totales, nitrógeno amoniacal, fósforo, potencial de hidrógeno y la relación DBO/DQO. Los demás parámetros no se incluyen por falta de información en los informes otorgados.

Cuadro 18. Resultados obtenidos de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades	Límite de vertido
24/1/19	909	184	mg/L	150
30/7/19	700	126	mg/L	150
23/9/19	1155	174	mg/L	150
24/10/19	631	307	mg/L	150
12/8/20	587	122	mg/L	150
2/10/20	1571	122	mg/L	150

Fuente: AyA, 2020

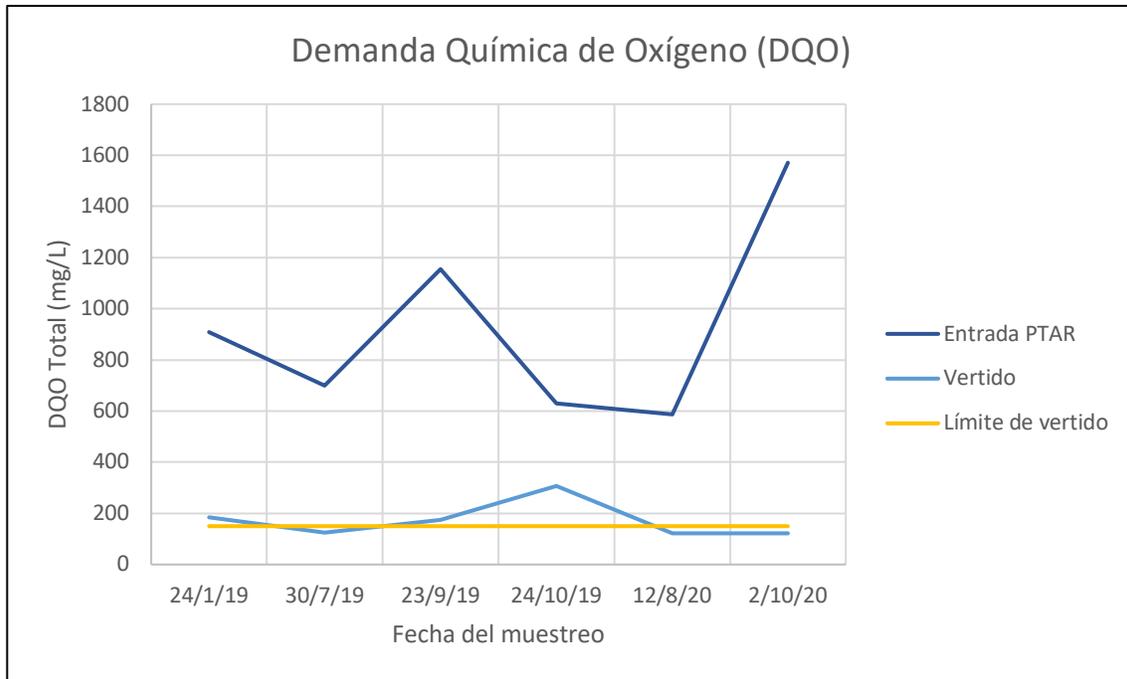


Figura 36. Gráfico de dispersión de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)
Fuente: AyA, 2020

Cuadro 19. Resultados obtenidos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades	Límite de vertido
24/1/19	403	91	mg/L	50
30/7/19	308	47	mg/L	50
23/9/19	445	58	mg/L	50
24/10/19	260	137	mg/L	50
12/8/20	183	15	mg/L	50
2/10/20	345	32	mg/L	50

Fuente: AyA, 2020

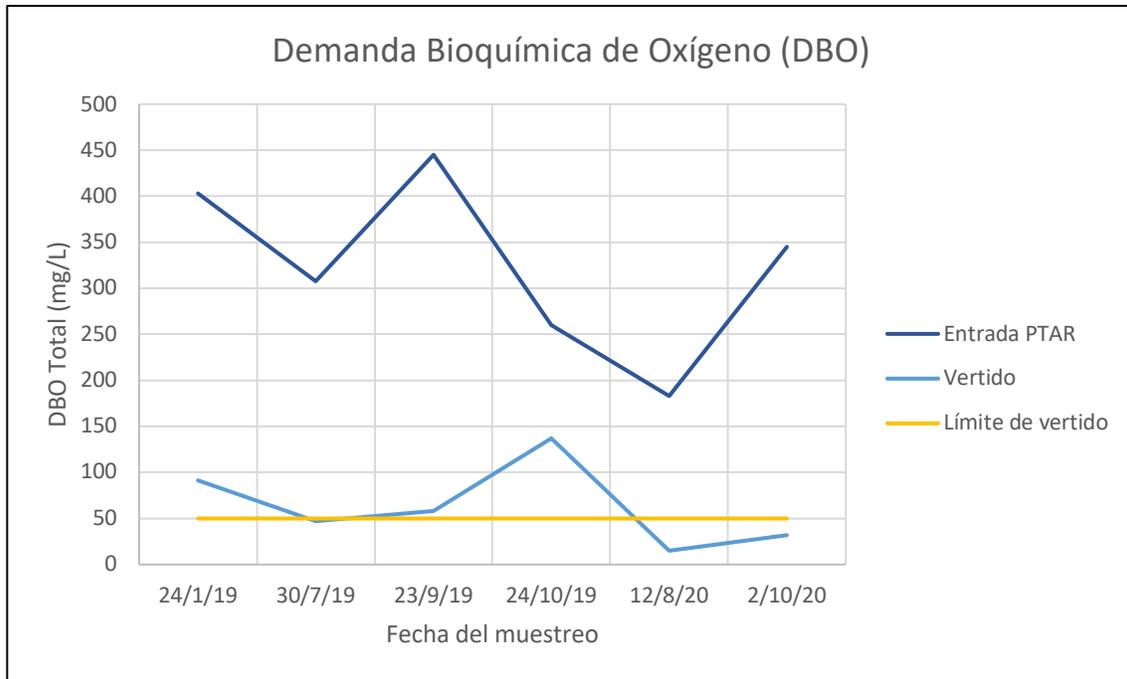


Figura 37. Gráfico de dispersión de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
Fuente: AyA, 2020

Cuadro 20. Resultados obtenidos de los Sólidos Totales (ST)

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades
24/1/19	682	596	mg/L
30/7/19	628	542	mg/L
23/9/19	728	580	mg/L
24/10/19	630	500	mg/L
12/8/20	924	522	mg/L
2/10/20	1266	446	mg/L

Fuente: Laboratorio Nacional de Aguas, 2020

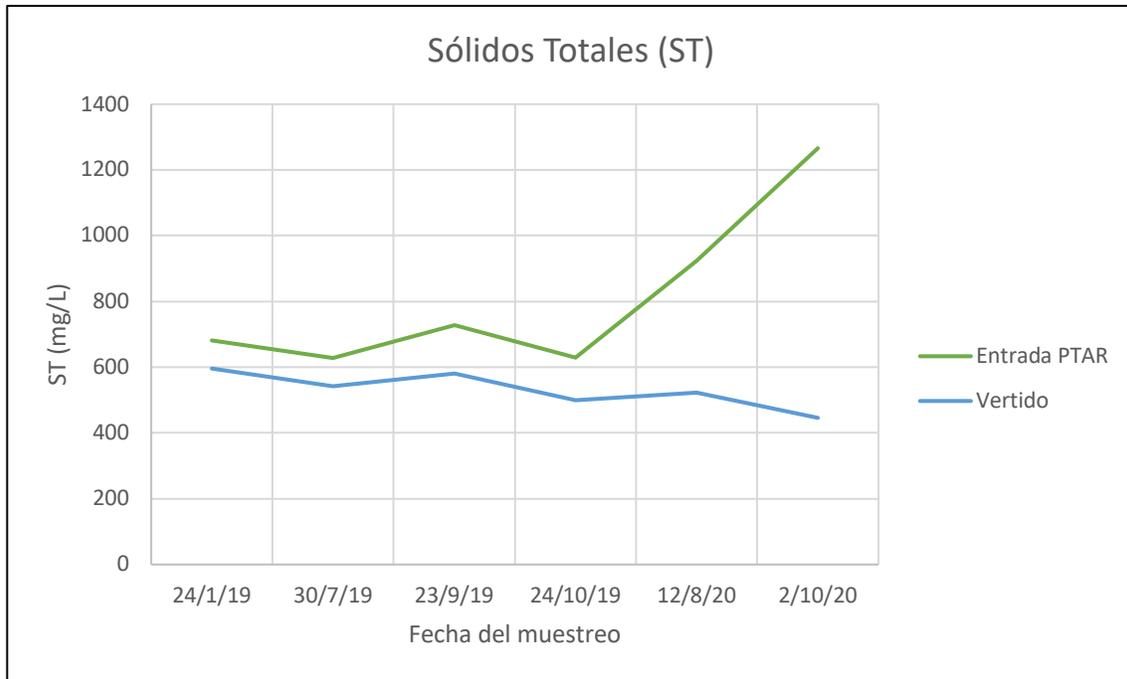


Figura 38. Gráfico de dispersión de los Sólidos Totales (ST)
Fuente: AyA, 2020

Cuadro 21. Resultados obtenidos de los Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades	Límite vertido
24/1/19	156	80	mg/L	50
30/7/19	140	57	mg/L	50
23/9/19	175	67	mg/L	50
24/10/19	180	62	mg/L	50
12/8/20	1155	2	mg/L	50
2/10/20	608	12	mg/L	50

Fuente: AyA, 2020

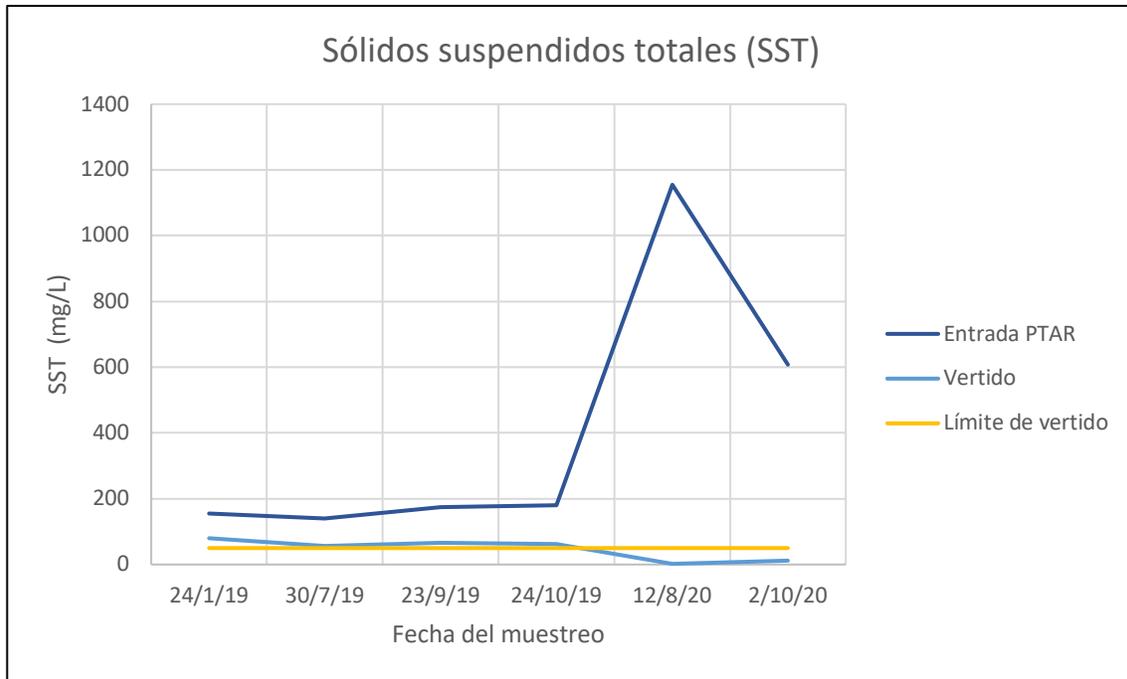


Figura 39. Gráfico de dispersión de los Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Fuente: AyA, 2020

Cuadro 22. Resultados obtenidos de Nitrógeno Amoniacal

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades
24/1/19	-	-	mg/L
30/7/19	28	14	mg/L
23/9/19	72	96	mg/L
24/10/19	16	68	mg/L
12/8/20	38,3	27,2	mg/L
2/10/20	84	61,4	mg/L

Fuente: AyA, 2020

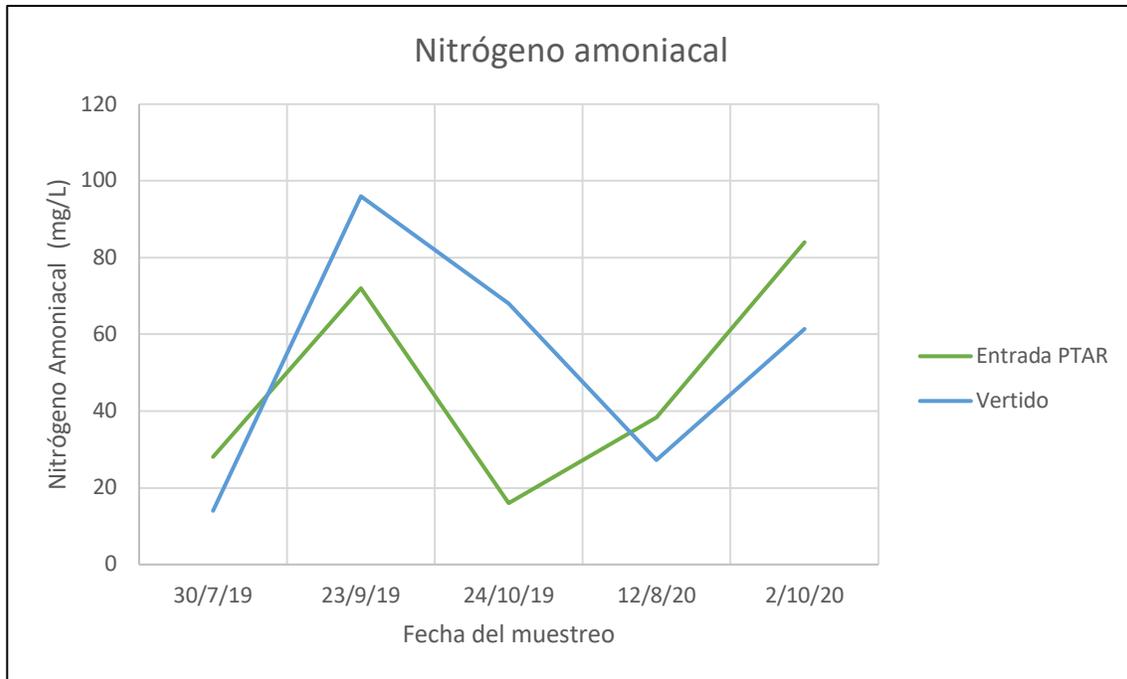


Figura 40. Gráfico de dispersión del Nitrógeno Amoniacal
Fuente: AyA, 2020

Cuadro 23. Resultados obtenidos de Fósforo

Fecha	Entrada	Vertido	Unidades
24/1/19	-	-	-
30/7/19	0,72	2	mg/L
23/9/19	0,74	0,24	mg/L
24/10/19	0,57	0,6	mg/L
12/8/20	5,3	0,8	mg/L
2/10/20	7,36	-	mg/L

Fuente: AyA, 2020

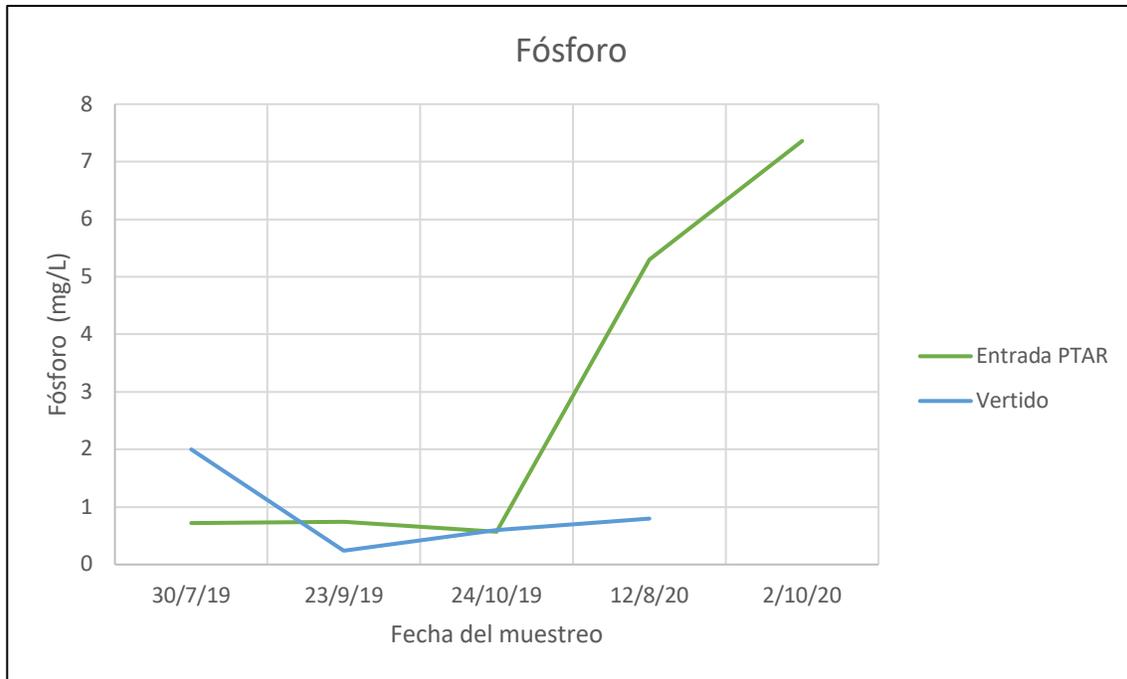


Figura 41. Gráfico de dispersión del Fósforo total
Fuente: AyA, 2020

Cuadro 24. Resultados obtenidos de Potencial de Hidrógeno (pH)

Fecha	Entrada	Vertido	Límite inferior	Límite superior
24/1/19	7,83	7,69	5	9
30/7/19	7,7	7,1	5	9
23/9/19	7,85	7,93	5	9
24/10/19	7,7	7,36	5	9
12/8/20	8,32	7,72	5	9
2/10/20	7,65	7,7	5	9

Fuente: AyA, 2020

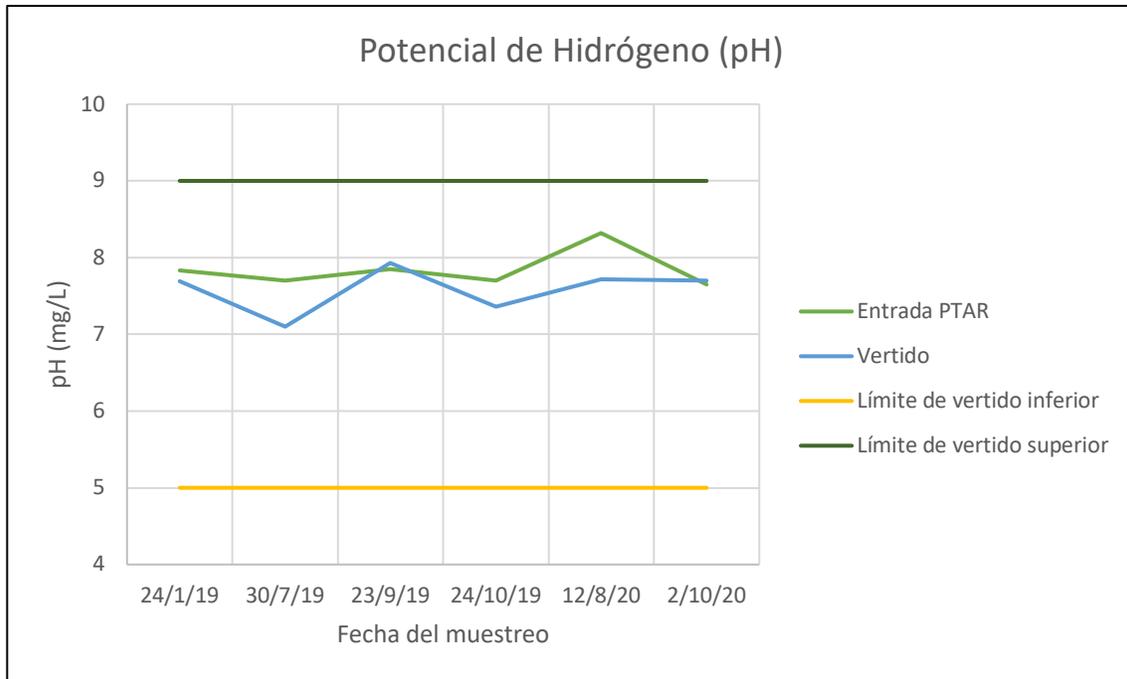


Figura 42. Gráfico de dispersión del Potencial de Hidrógeno (pH)

Fuente: AyA, 2020

Cuadro 25. Resultados obtenidos de la relación DBO/DQO

Fecha	Entrada	Vertido
24/1/19	0,443	0,495
30/7/19	0,440	0,373
23/9/19	0,385	0,333
24/10/19	0,412	0,446
12/8/20	0,312	0,123
2/10/20	0,220	0,262

Fuente: AyA, 2020

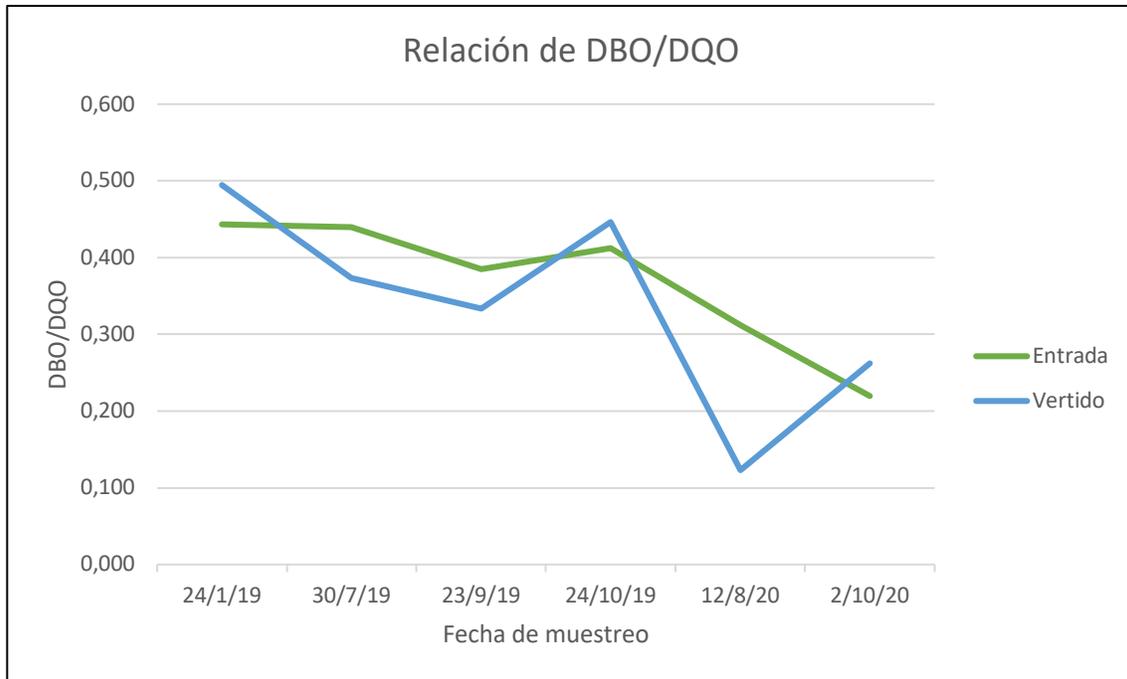


Figura 43. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO
Fuente: AyA, 2020

Con los resultados vistos anteriormente, se puede apreciar que los parámetros estudiados tuvieron un aumento considerable durante el año 2020, lo cual se puede reconocer como un efecto indirecto de la pandemia por el COVID-19, ya que la mayoría de habitantes de los hogares pasan mayor tiempo en casa debido al aislamiento.

Al analizar los resultados obtenidos de DQO y DBO se puede observar que la PTAR realiza una buena labor de remoción de estos parámetros, sin embargo la mitad de los valores no logran cumplir con el límite establecido de vertido, y con respecto a los sólidos suspendidos totales solo los dos muestreos realizados en el año 2020 cumplieron con el límite de vertido. Por otro lado el potencial de hidrógeno es el único parámetro que cumple en su totalidad el límite de vertido.

También es importante considerar la influencia de las aguas pluviales en los resultados obtenidos, donde en los meses de la estación lluviosa con mayor cantidad de precipitaciones (por ejemplo octubre) el sistema de la PTAR muestra valores menores como es el caso en los sólidos totales.

5.5 Resultados obtenidos de la investigación en la PTAR

5.5.1 Resultados de las pruebas de parámetros de control

El Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales establece que el pH debe estar en un rango de 5 a 9 esto con el fin de propiciar la actividad biológica encargada del tratamiento de las aguas. En el Cuadro 26 se puede observar que el promedio de los valores de pH medidos en los distintos muestreos se encuentran dentro del rango, solo existe un valor de 9,03 en el muestreo 4 a la entrada de la PTAR que sobrepasa este límite.

En general los valores de pH son muy similares, excepto en la entrada a la PTAR donde estos presentan gran variabilidad como se muestra en la siguiente figura.

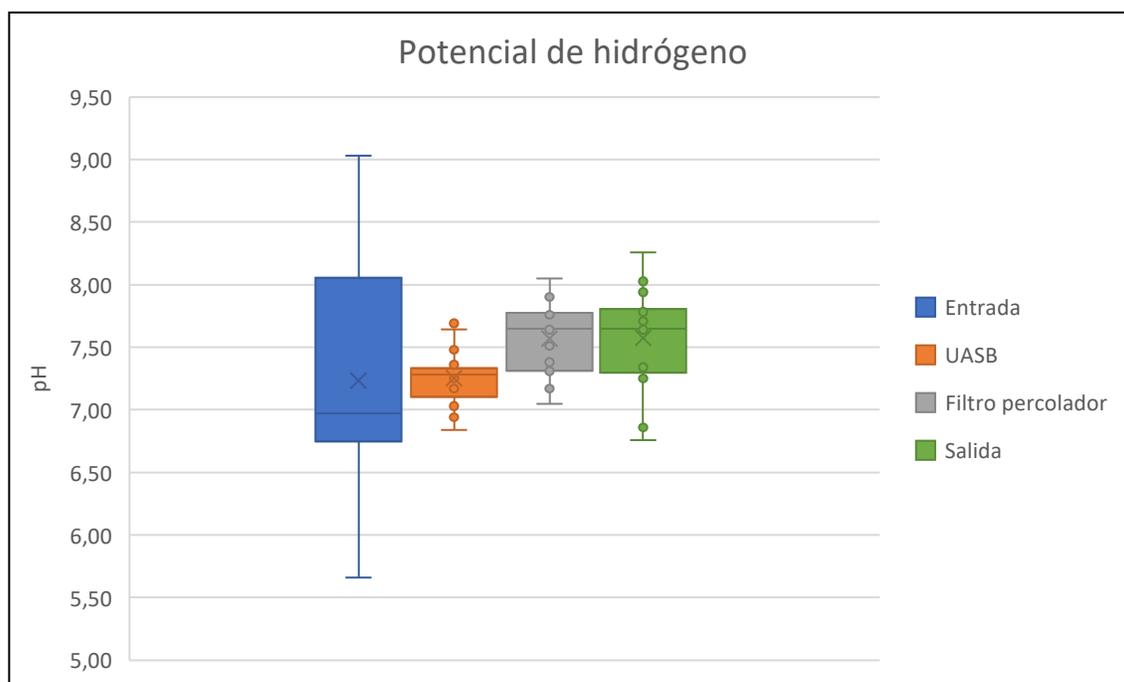


Figura 44. Gráfico de cajas del potencial de hidrógeno en la PTAR

Cuadro 26. Resultados de pH obtenidos en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR		Salida UASB		Salida Filtro percolador		Salida PTAR		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	0,31	7,93	0,08	7,40	0,02	7,86	0,09	7,75	4
2 L/min	0,61	7,49	0,02	7,21	0,06	7,58	0,12	7,25	6
3 L/min	0,34	6,55	0,06	7,17	0,07	7,49	0,10	7,81	4
4 L/min	0,09	6,70	0,00	7,27	0,02	7,30	0,00	7,67	3

Los reportes operacionales históricos presentados en la sección 5.4 Datos históricos en la PTAR, presenta un promedio de pH del 6,4 y una desviación estándar de 0,6, siendo muy similares a los resultados obtenidos de pH en esta investigación. Lo mismo sucede con los valores obtenidos en las pruebas realizadas por el Laboratorio Nacional de Aguas, donde tanto a entrada como el vertido se encuentran dentro del rango de pH de 5 a 9.

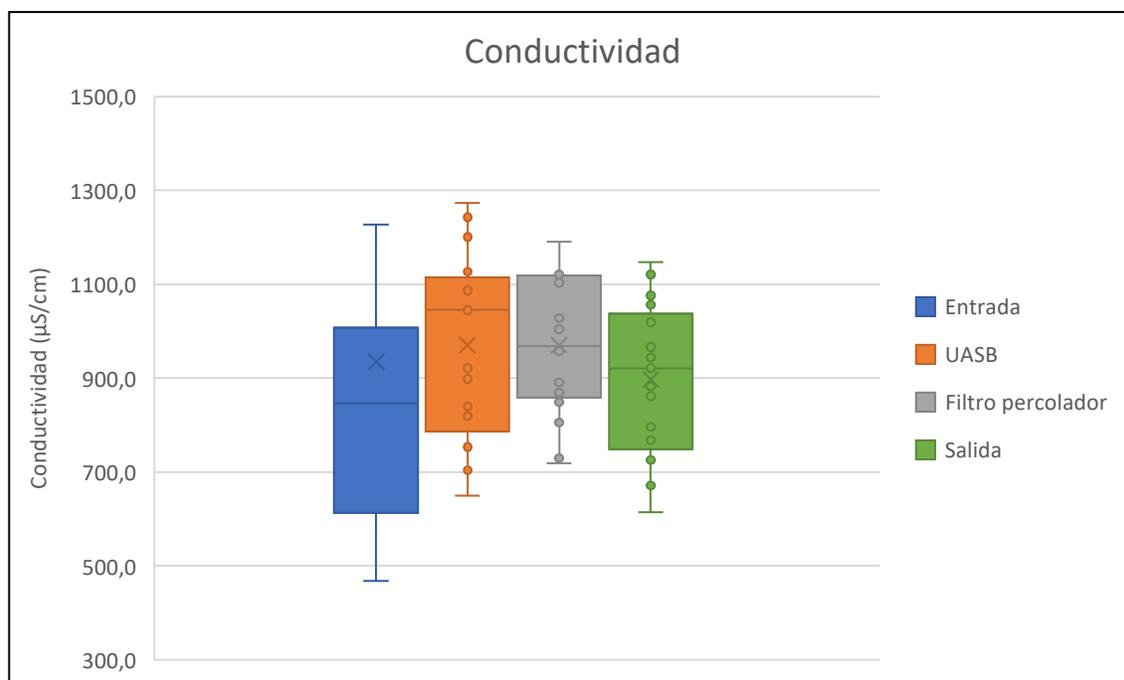


Figura 45. Gráfico de cajas de conductividad en la PTAR

Cuadro 27. Resultados obtenidos de conductividad en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (µS/cm)		Salida UASB (µS/cm)		Salida Filtro percolador (µS/cm)		Salida PTAR (µS/cm)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	234132,07	888,08	8178,75	1151,50	1408,50	1092,00	13976,35	971,65	4
2 L/min	380488,58	1053,23	20871,43	894,33	4437,60	896,50	18170,73	837,67	6
3 L/min	21875,21	724,38	24132,15	1069,78	6659,81	1100,95	6456,09	1028,30	4
4 L/min	24168,70	1041,87	11449,40	750,43	6192,65	779,77	12089,25	740,70	3

Con respecto a la conductividad, los componentes de la PTAR tienen un comportamiento similar, presentando mayor variabilidad la entrada como se demuestra en el Cuadro 27 con una varianza sumamente elevada.

Los valores promedio de la conductividad oscilan entre los 724,38 µS/cm y los 1151,50 µS/cm.

Como se menciona anteriormente en el documento, las aguas residuales urbanas presentan una conductividad eléctrica con valores en el rango de 500 a 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo que en el Cuadro 27 se muestran que los valores promedio en la PTAR se encuentran de este rango. En términos generales solo dos valores en todos los muestreos se encuentran fuera de este rango y corresponden a la entrada a la PTAR. Sin embargo, ninguno de estos datos sobrepasa los 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor con el cual se afecta el proceso biológico de depuración.



Figura 46. Gráfico de cajas de sólidos disueltos totales en la PTAR

Cuadro 28. Resultados obtenidos de sólidos disueltos totales en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (ppm)		Salida UASB (ppm)		Salida Filtro percolador (ppm)		Salida PTAR (ppm)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	368045,78	689,40	38609,18	969,73	7917,35	994,78	94896,98	753,03	4
2 L/min	395445,71	1075,27	118287,88	1172,90	4334,97	963,40	15533,61	841,98	6
3 L/min	1582,99	1011,13	14010,98	1116,40	2148,65	1149,23	26288,69	1150,75	4
4 L/min	24598,72	1062,83	7128,35	929,53	1063,11	959,67	10027,98	750,23	3

Los valores obtenidos de varianza de los sólidos disueltos totales demuestran la gran variabilidad de los datos con respecto a la media principalmente en la entrada a la PTAR y en la salida de esta. Los valores son tan variantes que en algunos casos es

mayor la cantidad de sólidos totales a la salida de la PTAR que a la entrada de esta lo cual significa que las unidades de tratamiento no están realizando correctamente su labor de remoción de sólidos disueltos totales.

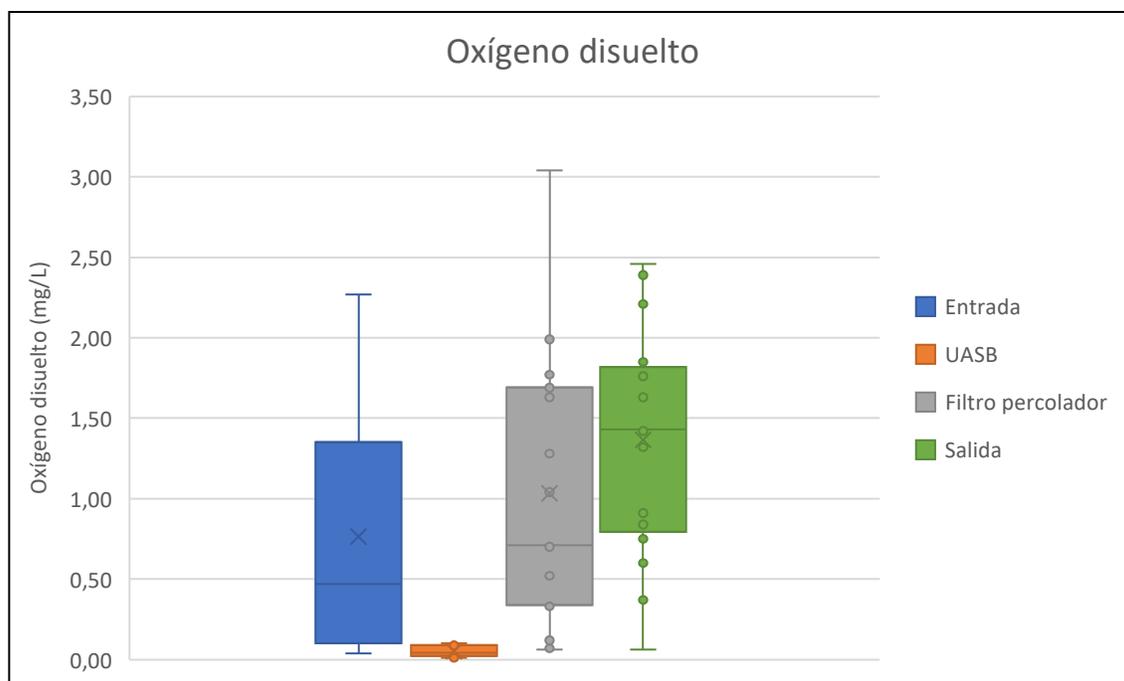


Figura 47. Gráfico de cajas del oxígeno disuelto en la PTAR

Cuadro 29. Resultados obtenidos de oxígeno disuelto en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	0,03	1,32	0,00	0,07	0,15	1,20	0,33	1,62	4
2 L/min	0,58	0,71	0,00	0,04	0,95	1,35	0,52	1,51	6
3 L/min	0,02	0,20	0,00	0,04	0,01	0,15	0,24	0,71	4
4 L/min	0,96	0,89	0,00	0,05	0,21	1,36	0,02	1,61	3

Como es de esperarse el oxígeno disuelto a la salida del UASB tiene los valores más bajos, lo que se puede observar en la Figura 47. Lo anterior es porque el reactor es un sistema anaerobio, contrario al filtro percolador donde por el contrario se puede observar un aumento del promedio de los valores de oxígeno disuelto.

La variabilidad de los datos medidos de oxígeno disuelto con respecto a la media son muy bajos, como se observa en los valores de varianza del cuadro anterior. Lo

anterior se observa principalmente en la salida del UASB donde la varianza es 0 mg/L.

5.5.2 Resultados las pruebas de nutrientes: nitrito, nitrato nitrógeno amoniacal y fósforo

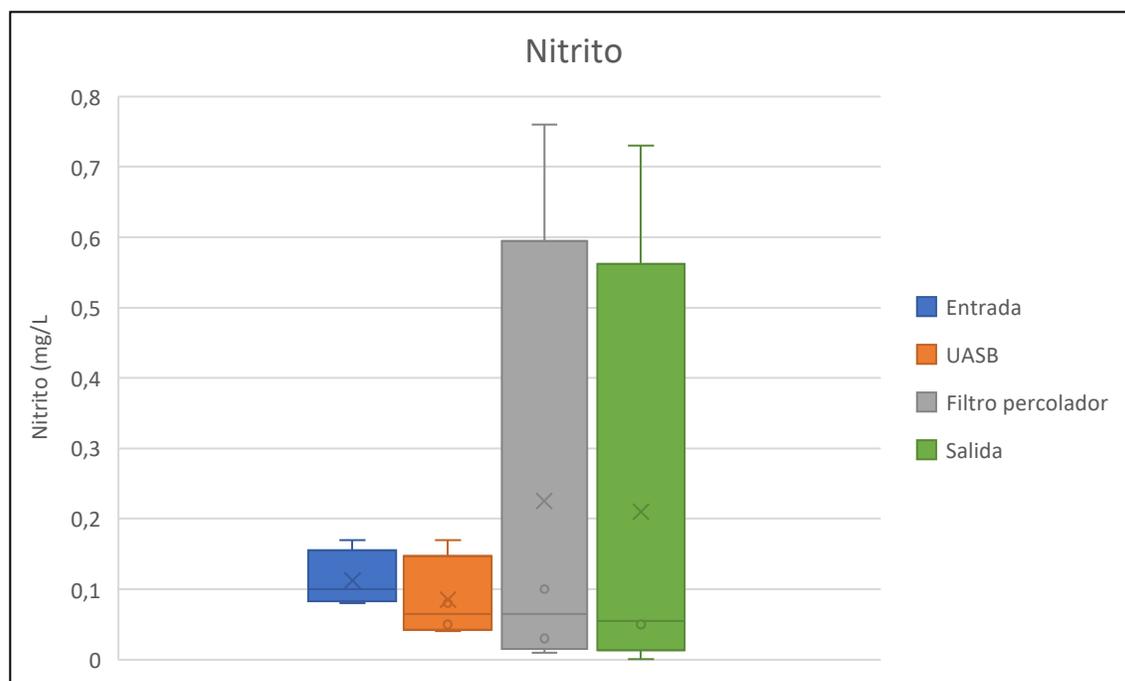


Figura 48. Gráfico de cajas del nitrito presente en la PTAR

Cuadro 30. Resultados obtenidos de nitrito en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 L/min	0,001	0,113	0,003	0,085	0,097	0,225	0,091	0,210	4
2 L/min	0,001	0,112	0,001	0,035	0,066	0,398	0,021	0,119	6
3 L/min	0,000	0,095	0,001	0,068	0,001	0,058	0,009	0,088	4
4 L/min	0,002	0,130	0,000	0,023	0,075	0,399	0,004	0,077	3

Los valores de nitrito a la entrada de la PTAR son menores a los valores de vertido de esta, lo que significa que durante el tratamiento de las aguas residuales, las unidades no remueven el parámetro y por el contrario colaboran en la formación de este.

Según el Departamento de Salud Pública de California (Water Boards California, 2013) un valor aceptable de contaminante de nitrito en el agua superficial es de 1

mg/L. Ningún resultado obtenido en la salida de la PTAR sobrepasa este valor por lo que se puede mencionar que la cantidad de nitrato vertido no afectará al cuerpo receptor.

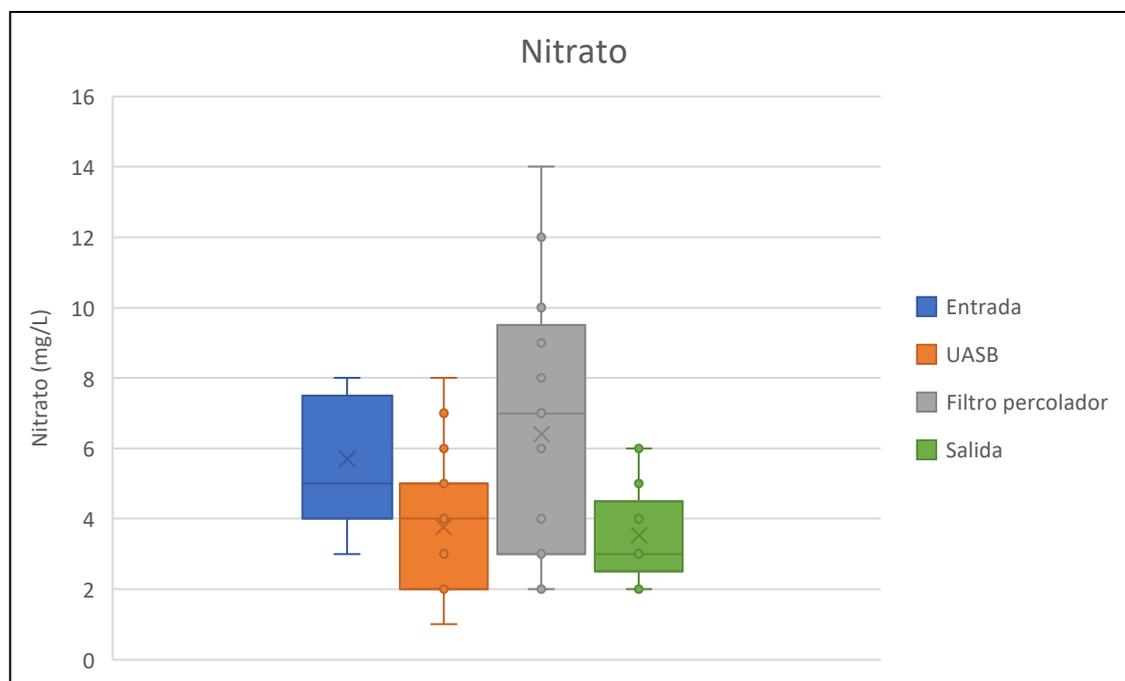


Figura 49. Gráfico de cajas del nitrato presente en la PTAR

Cuadro 31. Resultados obtenidos de nitrato en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 Lmin	2,69	5,25	5,19	6,25	3,19	5,25	0,69	2,75	4
2 L/min	3,00	6,00	19,81	6,83	15,22	4,67	3,58	3,50	6
3 L/min	4,69	5,75	14,05	5,88	6,19	3,75	2,50	4,00	4
4 L/min	0,67	7,00	6,00	5,00	2,89	8,33	0,22	3,33	3

Según el Departamento de Salud Pública de California (Water Boards California, 2013) el contenido de nitrato en las aguas superficiales debe ser menor a los 45 mg/L para no afectar los seres vivos en su hábitat natural. En el cuadro anterior se puede apreciar que ningún valor sobrepasa este límite, y específicamente en la salida de la PTAR que corresponde al agua de vertido al cuerpo receptor el máximo valor corresponde a 4 mg/L.

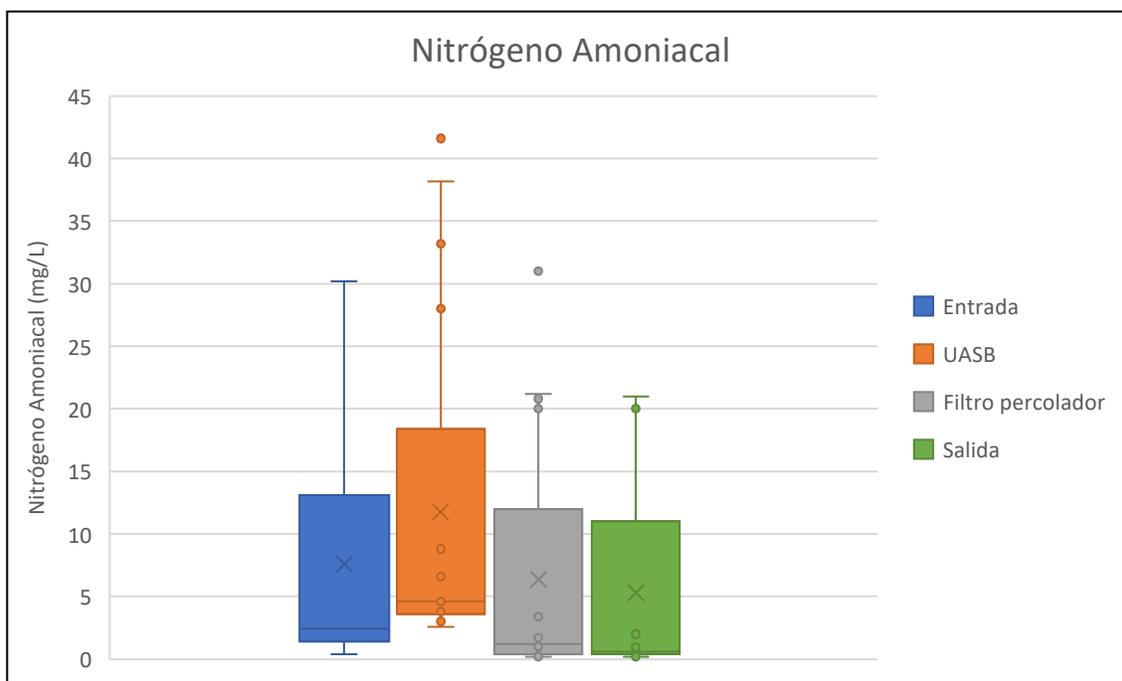


Figura 50. Gráfico de cajas del nitrógeno amoniacal presente en la PTAR

Cuadro 32. Resultados obtenidos de nitrógeno amoniacal en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 L/min	163,23	15,05	377,81	20,50	298,39	17,85	355,46	18,96	4
2 L/min	0,67	1,57	0,08	0,70	0,23	0,82	0,13	0,61	6
3 L/min	0,95	2,95	1,89	2,95	1,61	2,45	0,50	0,80	4
4 L/min	0,51	1,80	0,04	0,73	0,01	0,27	0,00	0,40	3

En los resultados presentados anteriormente se puede observar que los valores de nitrógeno amoniacal disminuyen conforme el agua residual es tratada por los distintos componentes de la PTAR. Sin embargo, se presenta la excepción con los muestreos realizados en enero y febrero del 2021 (caudal de 1 L/min en el Keisya) donde los valores de nitrógeno amoniacal y su varianza se encuentran muy por encima de los resultados correspondientes a los demás muestreos.

Los resultados de nitrógeno amoniacal obtenidos por el Laboratorio Nacional de Aguas son similares a los obtenidos con los muestreos de enero y febrero del 2021, presentando un valor mínimo en el vertido de 14 mg/L, mientras que el valor mínimo de vertido en esta investigación corresponde a 0,61 mg/L, lo que indica que la

producción de nitrógeno amoniacal en la PTAR ha disminuido considerablemente ya sea por condiciones de tratamiento de los componentes de la PTAR o también por factores externos como la influencia de la estación lluviosa en las aguas residuales.

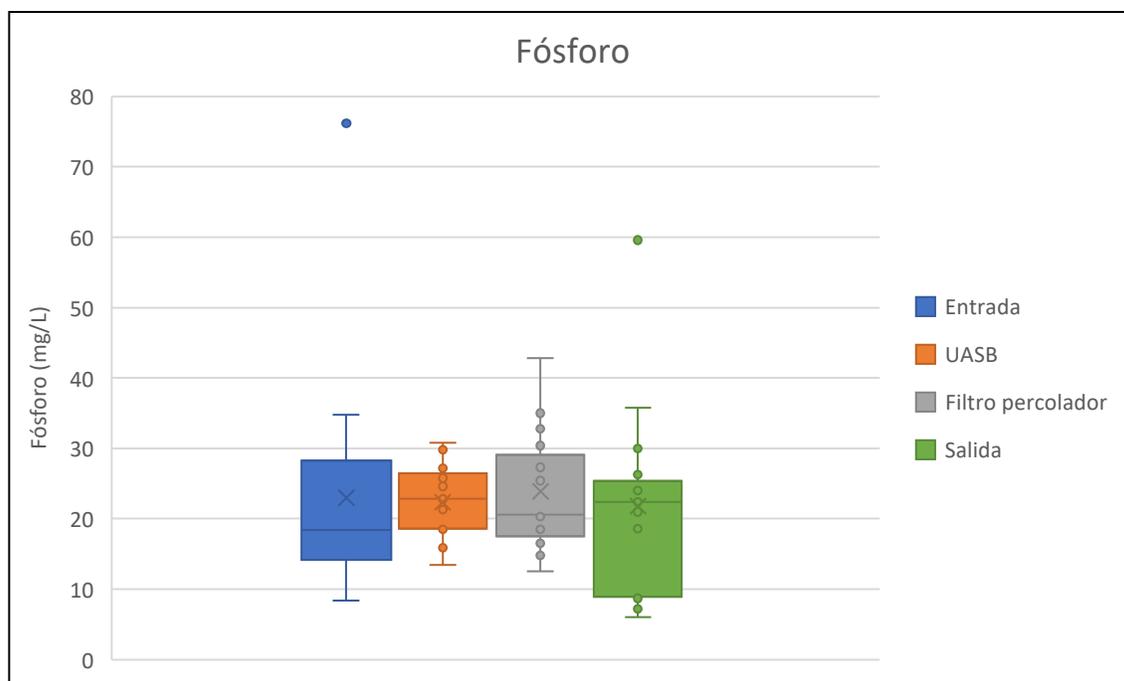


Figura 51. Gráfico de cajas del fósforo presente en la PTAR

Cuadro 33. Resultados obtenidos de fósforo en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 Lmin	538,21	38,30	6,17	31,50	12,83	31,90	247,65	34,55	4
2 L/min	49,30	20,15	16,80	21,77	8,33	20,48	64,82	16,28	6
3 L/min	59,05	15,33	31,10	32,40	33,73	33,33	79,17	20,38	4
4 L/min	1,52	18,60	5,04	18,90	3,38	15,03	51,58	17,53	3

Las aguas residuales domésticas suelen tener concentraciones de fósforo que oscilan entre los 6 y 20 mg/L (Teixeira et al, 2013), sin embargo en los resultados obtenidos se observa que los valores de vertido se encuentran en un rango de los 6,0 mg/L hasta los 59,6 mg/L, y se espera que el fósforo de vertido a aguas superficiales y el suelo no sobrepase los 3 mg/L por lo que es una condición que debe mejorarse en el manejo de la PTAR.

Los muestreos realizados por el Laboratorio Nacional de Aguas presenta valores de vertido de fósforo que están entre los 0,24 mg/L hasta los 2 mg/L, muy por debajo de los valores obtenidos en este estudio.

5.5.3 Resultados de las pruebas de sólidos: totales, suspendidos totales y volátiles

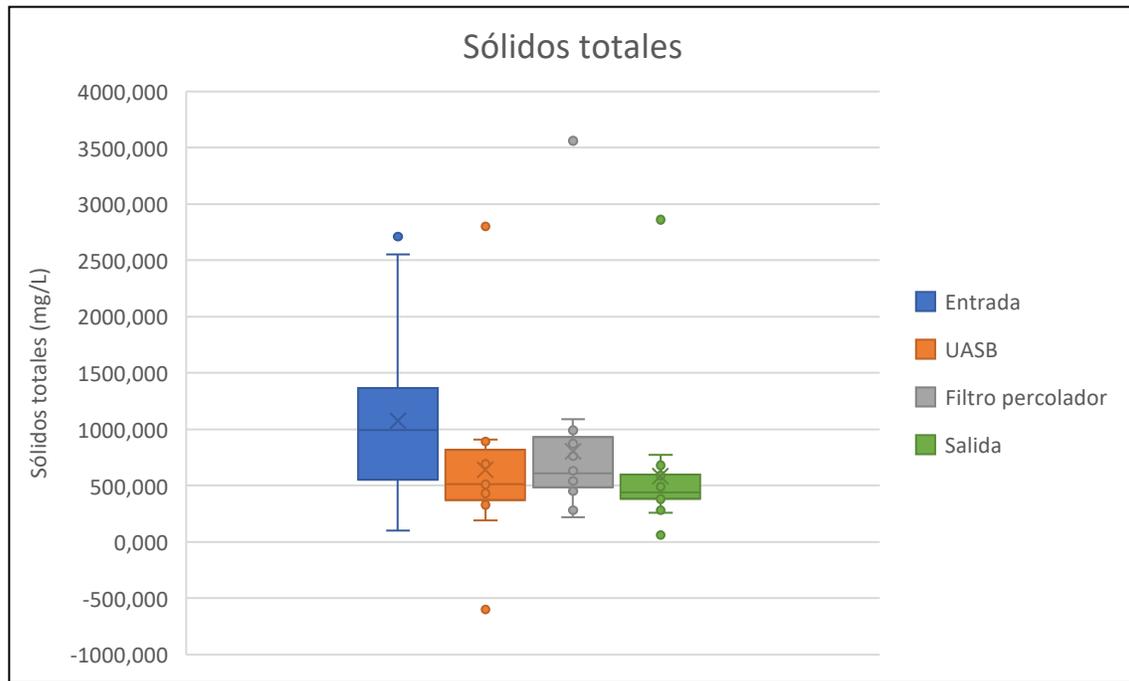


Figura 52. Gráfico de cajas de los sólidos totales presentes en la PTAR

Cuadro 34. Resultados obtenidos de sólidos totales en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 Lmin	186718,7	932,5	8425,0	805,0	54618,7	857,5	13518,7	482,5	4
2 L/min	589518,8	1272,5	15500,0	400,0	19918,8	492,5	4318,8	387,5	4
3 L/min	836268,7	1232,5	939325,0	1145,0	1666350,0	1350,0	993725,0	1135,0	4
4 L/min	52422,2	1203,3	65066,7	550,0	43622,2	696,7	44600,0	490,0	3

La cantidad de sólidos totales en la entrada a la PTAR son mayores a los sólidos totales en el resto de los sistemas de tratamiento. Por el contrario, en la salida de la PTAR se muestran los menores valores de sólidos totales, por lo que los componentes sí remueven este parámetro de las aguas residuales.

En este estudio se tiene un promedio de sólidos totales en la salida de la PTAR en un rango de 387,5 mg/L a los 1135,0 mg/L. Por otro lado, en los muestreos realizados por el Laboratorio Nacional de Aguas en los años 2019 y 2020 se tiene un vertido de sólidos totales en un rango de 446 mg/L a los 596 mg/L. Ambos estudios tienen valores similares de vertido del parámetro al cuerpo de agua.

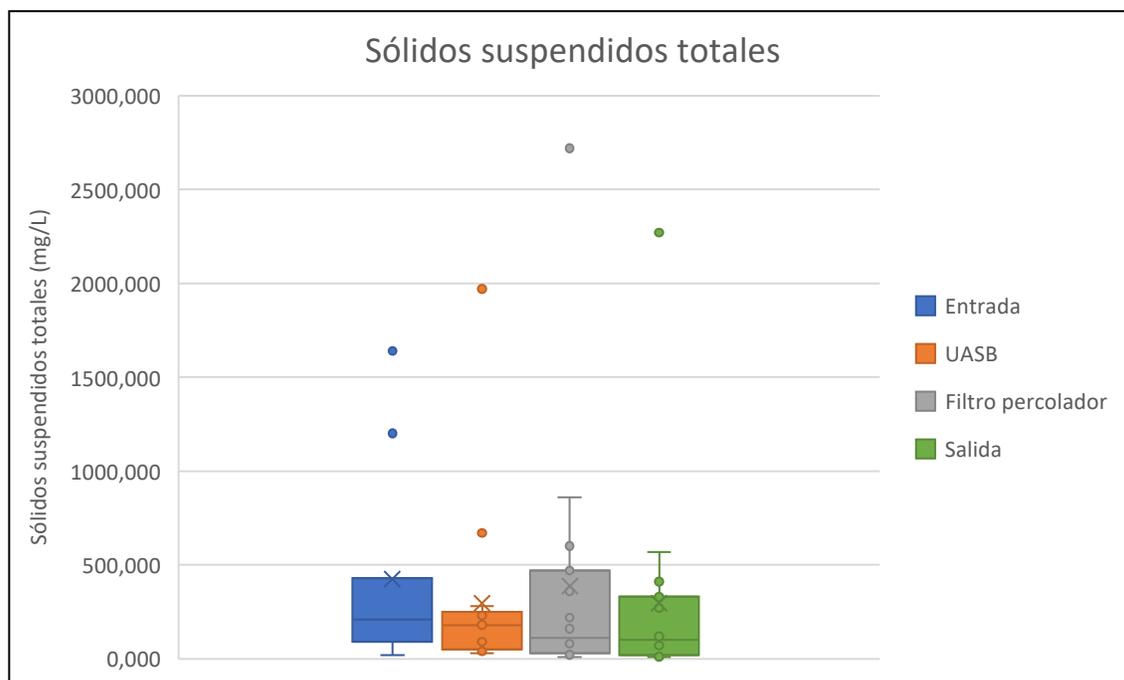


Figura 53. Gráfico de cajas de los sólidos suspendidos totales presentes en la PTAR

Cuadro 35. Resultados obtenidos de sólidos suspendidos totales en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 Lmin	203468,7	427,5	58468,8	277,5	113050,0	360,0	21968,7	202,5	4
2 L/min	6968,8	112,5	4025,0	95,0	58618,8	182,5	2025,0	45,0	4
3 L/min	359468,7	607,5	626675,0	605,0	1220318,8	817,5	760768,8	797,5	4
4 L/min	228355,6	583,3	4288,9	173,3	4466,7	130,0	3355,6	83,3	3

El Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales indica que la cantidad admisible de vertido de sólidos suspendidos totales (SST) es de 50 mg/L y con los resultados de la investigación se puede determinar que la salida de la PTAR no está cumpliendo esto, ya que la gran cantidad de los muestreos sobrepasan este límite.

En los reportes operacionales de mayo y noviembre del 2020, se obtuvieron valores de SST de 15 y 12 mg/L respectivamente en el vertido. En las pruebas realizadas por el Laboratorio Nacional de Aguas durante el 2019 y 2020 se obtuvieron valores de vertido de SST en un rango del 2 a los 80 mg/L. En ambos estudios el promedio de los SST da menor que el promedio obtenido en esta investigación donde los valores promedio al vertido de la PTAR oscilan entre los 45 y 797 mg/L.

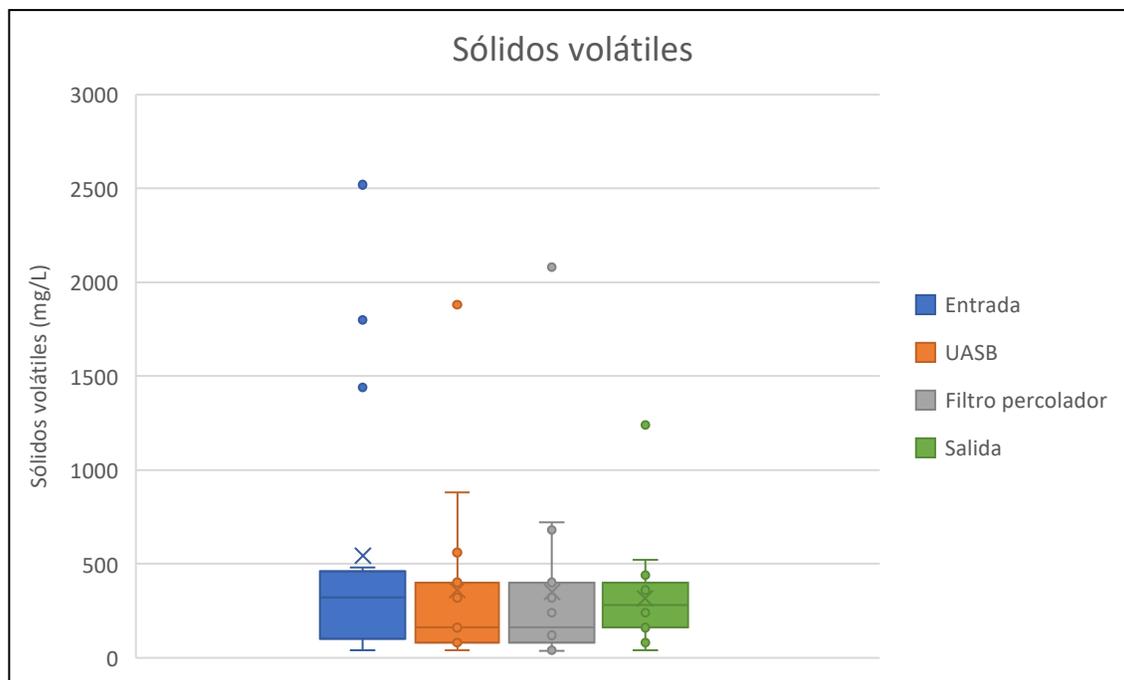


Figura 54. Gráfico de cajas de los sólidos volátiles presentes en la PTAR

Cuadro 36. Resultados obtenido de sólidos volátiles en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	25900,00	270,00	9900,00	150,00	547504,69	478,75	195500,00	510,00	6
2 L/min	945422,22	826,67	596622,22	493,33	6755,56	173,33	7466,67	320,00	4
3 L/min	41600,00	320,00	743200,00	1200,00	437600,00	960,00	8400,00	140,00	4
4 L/min	9955,56	373,33	11022,22	213,33	25955,56	173,33	22400,00	320,00	3

Los valores de sólidos volátiles en la entrada a la PTAR son muy variables, mientras que en los otros sistemas la variabilidad es menor, exceptuando el caso del décimo muestreo, el cual fue analizado anteriormente en los sólidos totales y sólidos suspendidos totales, ya que se tienen picos de sólidos en todo el tren de tratamiento.

En general, los altos valores de sólidos volátiles presentados en la PTAR indican que la labor de remoción de los sistemas de tratamiento no están cumpliendo con su objetivo, por lo que deben buscarse alternativas para el tratamiento de estos.

5.5.4 Resultados de las pruebas de DQO y DBO

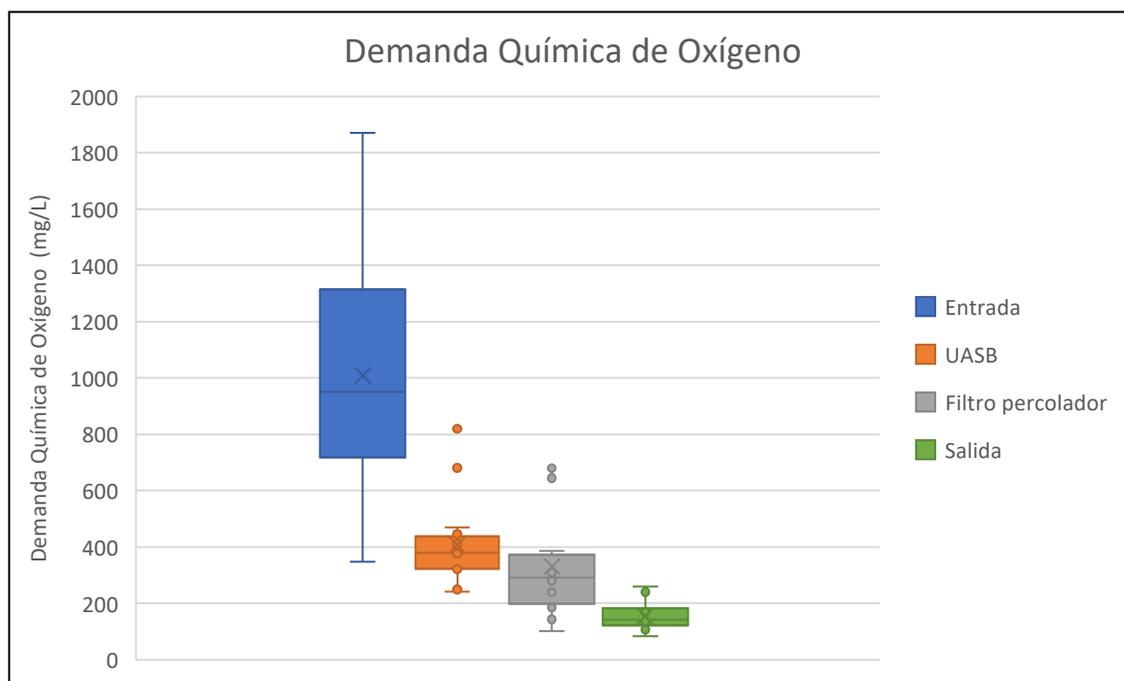


Figura 55. Gráfico de cajas de la demanda química de oxígeno presente en la PTAR

Cuadro 37. Resultados de DQO obtenidos en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	114886,19	751,75	16179,69	461,75	3014,75	308,50	1436,19	145,25	5
2 L/min	28109,44	796,40	5359,76	332,20	5369,44	219,60	1098,16	139,20	4
3 L/min	49230,19	1270,25	29498,00	526,00	24389,25	568,50	2642,00	202,00	4
4 L/min	206048,67	1359,00	2044,67	303,00	7664,22	221,67	60,67	128,00	3

Con respecto a la demanda química de oxígeno (DQO) el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales establece un límite de vertido de 150 mg/L lo cual no se cumple en seis muestreos realizados. La entrada a la PTAR presenta los valores mayores de DQO en los muestreos, además de la gran variabilidad de estos como se observa en la Figura 55.

En los reportes operacionales de mayo y noviembre 2020 se obtuvieron valores de DQO de 167 y 122 mg/L respectivamente, donde el muestreo de mayo se encuentra por encima de lo establecido por el reglamento. Asimismo, 3 de los 6 muestreos realizados por el Laboratorio Nacional de Aguas en el 2019 y 2020 se encuentran por encima de lo establecido por el reglamento con valores de 184, 174 y 307 mg/L. Al comparar estos resultados del Laboratorio Nacional de Aguas con los obtenidos en este estudio, se observa una gran similitud donde 6 de los 16 muestreos sobrepasaron el límite de vertido con un rango de valores de los 169 a 260 mg/L.

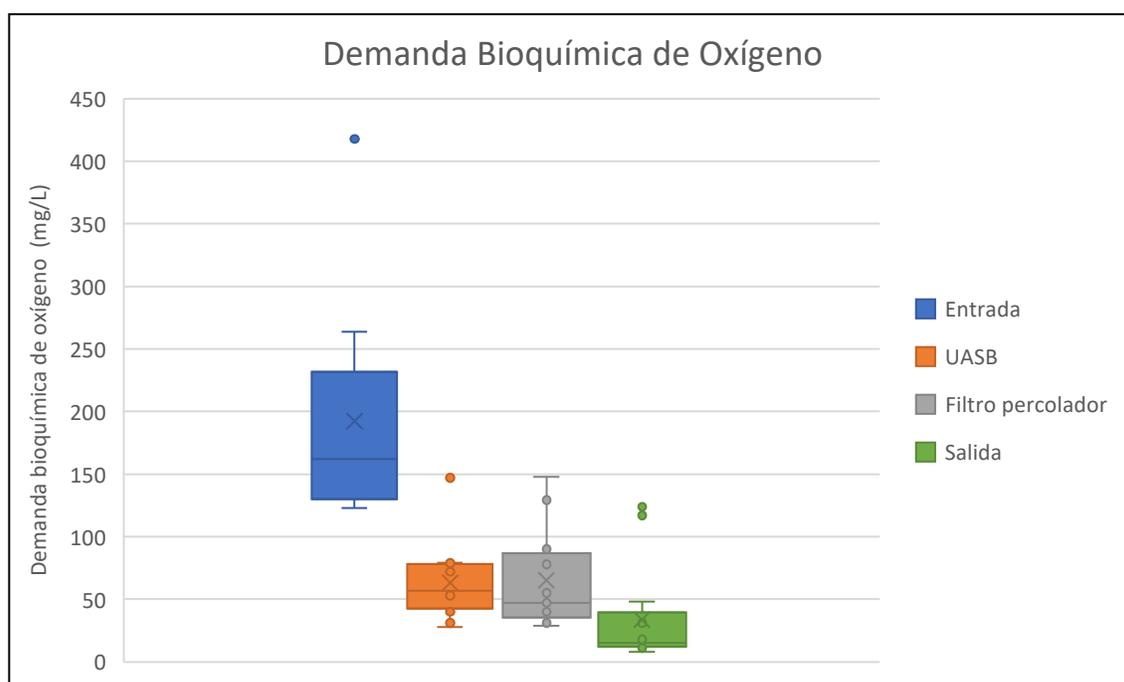


Figura 56. Gráfico de cajas de la demanda bioquímica de oxígeno presente en la PTAR

Cuadro 38. Resultados obtenidos de DBO en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 L/min	257,56	139,33	1464,67	94,00	2218,26	105,71	2337,56	56,33	3
2 L/min	6332,83	286,39	338,69	59,75	68,19	43,25	3,50	11,00	4
3 L/min	617,56	154,67	206,89	59,33	24,00	84,00	1718,00	61,00	3
4 L/min	725,81	157,03	105,23	40,29	32,67	34,00	2,89	14,33	3

Con respecto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales estipula un límite de vertido de 50 mg/l el cual se

incumple en dos muestreos realizados (10 y 12). En el cuadro anterior se observa 2 valores del promedio de DBO que sobrepasan el límite de vertido, correspondientes a 56,33 y 61 mg/L.

Además, se observa que los valores más altos de DBO son los de la entrada a la PTAR y disminuyen considerablemente al vertido por lo que el tren de tratamiento realiza su labor de remoción de este parámetro.

En los reportes operacionales realizados en mayo y noviembre del 2020 los resultados de DBO son de 25 y 32 mg/L, ambos por debajo del límite de vertido. Sin embargo, en las pruebas realizadas por el Laboratorio Nacional de Aguas en el 2019 y 2020, 3 de los 6 valores medidos sobrepasan el límite de vertido.

Los valores medidos a la salida del DBO que incumplen el vertido reglamentado puede deberse a condiciones puntuales del agua entrando al sistema en esos días del muestreo, ya que al ser una PTAR que recolecta las aguas residuales de una urbanización pequeña, cualquier alteración en los hogares puede provocar cambios en los resultados obtenidos.

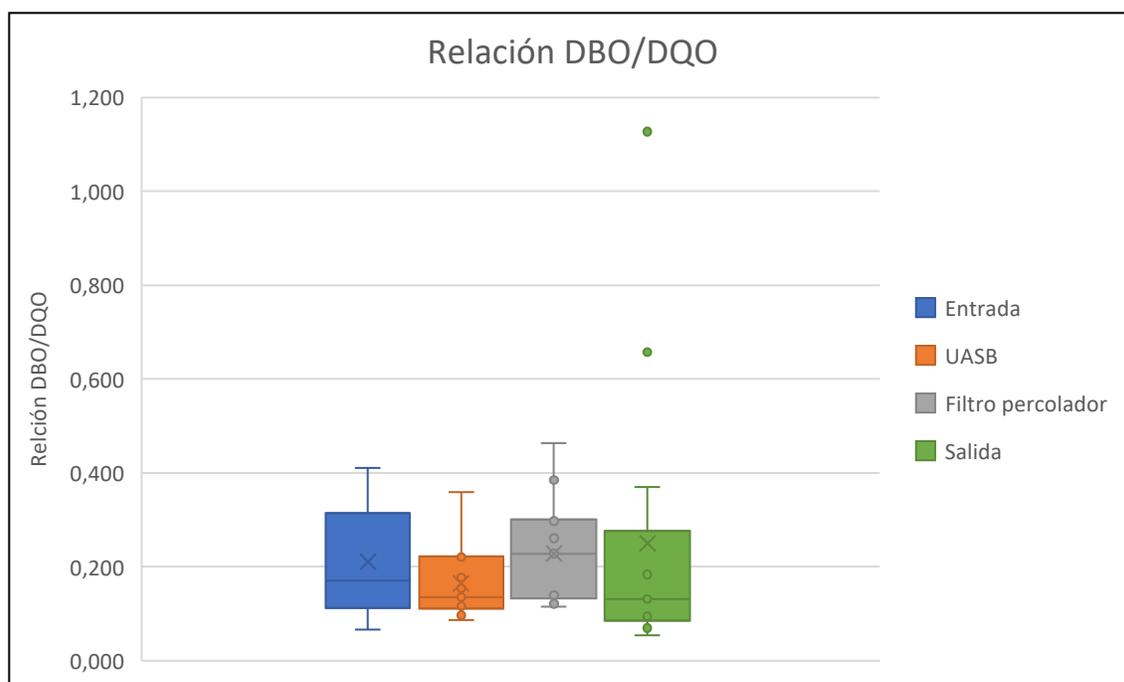


Figura 57. Gráfico de cajas de la relación DBO/DQO presente en la PTAR

Cuadro 39. Resultados obtenidos de la relación DBO/DQO en la PTAR

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR		Salida UASB		Salida Filtro percolador		Salida PTAR		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 L/min	0,003	0,176	0,012	0,209	0,021	0,323	0,210	0,481	3
2 L/min	0,002	0,351	0,002	0,187	0,003	0,228	0,001	0,093	4
3 L/min	0,000	0,125	0,000	0,113	0,004	0,177	0,058	0,365	3
4 L/min	0,006	0,141	0,003	0,141	0,007	0,185	0,000	0,113	3

Al momento de realizar la relación DBO/DQO es necesario quitar los muestreos 5, 11 y 16 de DQO, ya que estos muestreos al momento de calcular el DBO presentaron fallos técnicos en el laboratorio específicamente con los equipo de medición, los cuales se vieron afectados por cortes de electricidad y fallos mecánicos.

La relación DBO/DQO es un índice que permite la medición de la biodegradabilidad del agua residual. En general los valores de la relación menores a 0,2 en el efluente se consideran bajos y los superiores a 0,4 son muy biodegradables. El objetivo de los sistemas de tratamiento es de aumentar este índice para facilitar el tratamiento biológico.

El promedio de valores de la relación DBO/DQO a la salida de la PTAR permite identificar dos valores inferiores a 0,2 que son poco biodegradables y un valor superior a 0,4 indicando que es muy biodegradable, por lo que solo el valor de 0,365 se encuentra dentro del rango.

Si comparamos los resultados obtenidos en esta investigación y los del Laboratorio Nacional de Aguas realizados en el 2019 y 2020 se obtienen valores de relación DBP/DQO muy similares que están en un rango entre los 0,123 y 0,495.

CAPÍTULO 6. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

6.1 Condiciones de muestreo

Para el estudio del funcionamiento de la PTAR fue necesario realizar seis puntos de muestreo que permitieran analizar cada uno de los sistemas empleados para el tratamiento de aguas residuales. El muestreo se realizó tomando 1,5 L de agua residual que se traslada en hielera al sistema de refrigeración del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica.

Todos los muestreos fueron realizados durante la mañana entre las diez y doce horas del día. En el siguiente cuadro se puede observar las condiciones climáticas en el momento del muestreo, donde cabe destacar que no hubo presencia de precipitaciones durante la toma de las muestras.

Cuadro 40. Condiciones climáticas durante los muestreos realizados

Fecha	Condiciones climáticas
3 de septiembre del 2020	Soleado
9 de septiembre del 2020	Soleado
23 de septiembre del 2020	Soleado
29 de septiembre del 2020	Soleado
5 de octubre del 2020	Nublado
13 de octubre del 2020	Nublado
19 de octubre del 2020	Nublado
26 de octubre del 2020	Nublado
2 de noviembre del 2020	Nublado
7 diciembre del 2020	Soleado
7 de enero del 2021	Soleado
11 de enero del 2021	Soleado
18 de enero del 2021	Soleado
25 de enero del 2021	Soleado
1 de febrero del 2021	Soleado
9 de febrero del 2021	Soleado
15 de febrero del 2021	Soleado

Los muestreos se realizaron durante diecisiete semanas, nueve de estas tomadas durante la estación lluviosa y ocho durante la estación seca. En la Figura 58 se muestran los seis puntos de muestreo encerrados en un círculo amarillo los cuáles se explican a continuación y corresponden a: entrada a la PTAR, entrada al filtro percolador, salida del filtro percolador, salida de la torre izquierda del Keisya, salida de la torre derecha del Keisya y salida de la PTAR.

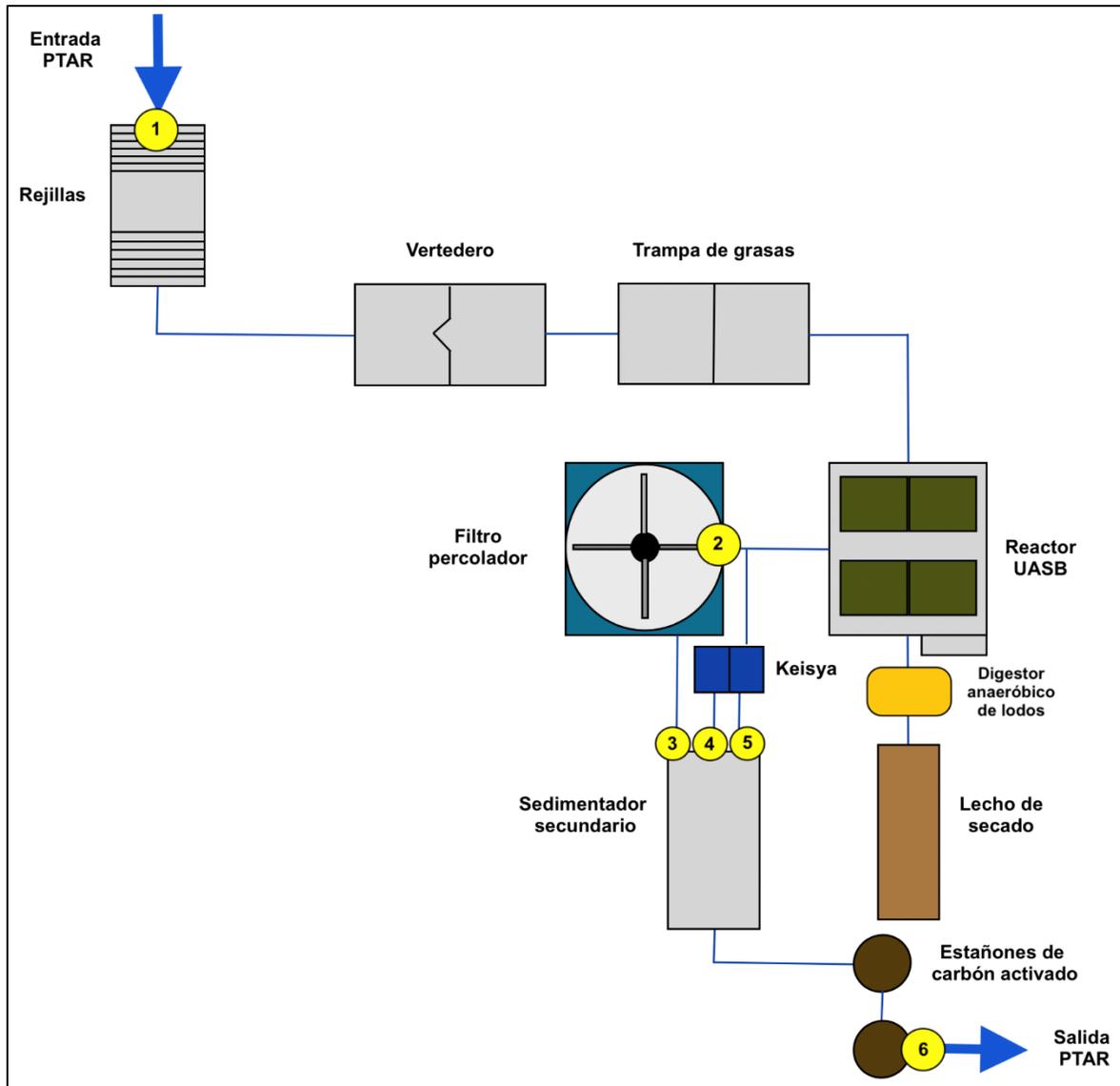


Figura 58. Ubicación de los puntos de muestreo

- **Punto 1: Entrada a la PTAR**

El muestreo realizado en la entrada a la PTAR se realiza específicamente en la tubería de entrada a la caja de rejillas (Figura 59) ubicada al inicio del tren de

tratamiento con el fin de analizar las condiciones de las aguas residuales a la entrada y con esto comprobar la efectividad de los sistemas de tratamiento que conforman la planta, además de poder analizar los resultados de este muestreo con los datos dados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.



Figura 59. Punto 1 de muestreo: Caja de rejillas

- **Punto 2: Entrada al filtro percolador**

El siguiente muestreo corresponde al que se realiza a la salida del reactor UASB o a la entrada del filtro percolador, permitiendo analizar las condiciones del agua residual después de ser tratada de manera anaerobia en el reactor UASB, y además permite conocer la calidad del agua que ingresa a la planta piloto tipo Keisya. El muestreo se realiza específicamente en los agujeros del brazo giratorio, el cual es necesario pausar su movimiento para tomar la muestra.



Figura 60. Punto 2 de muestreo: Entrada al filtro percolador

- **Punto 3: Salida del filtro percolador**

El punto 3 de muestreo corresponde a la salida del filtro percolador, el cual tiene una tubería que conecta su salida directamente con el sedimentador secundario, por lo que la muestra se realiza al final de esta tubería específicamente a la entrada del sedimentador secundario (Ver Figura 61).

Esta muestra tiene como objetivo conocer las condiciones del agua al someterse al tratamiento biológico aerobio en el filtro percolador.

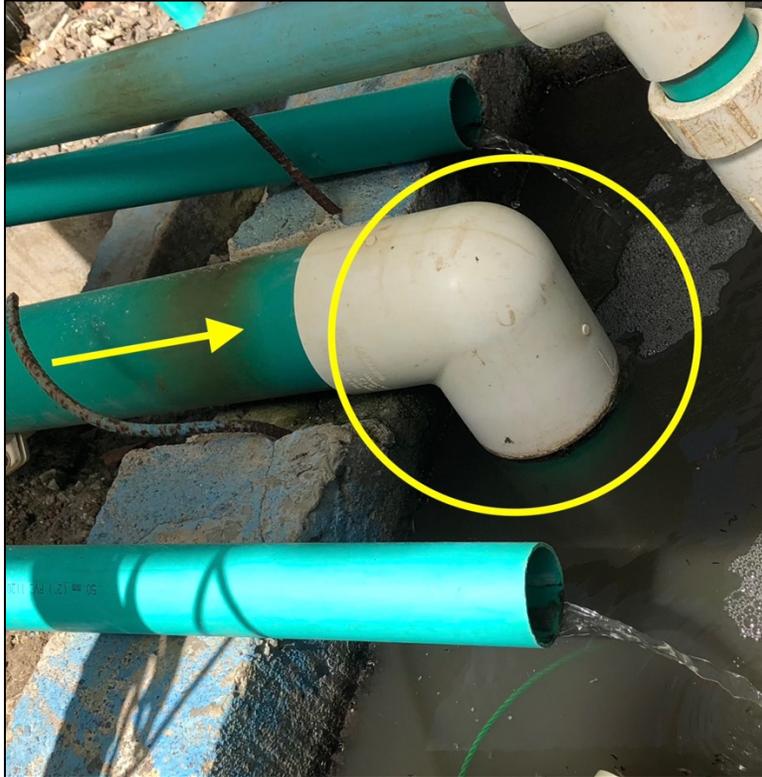


Figura 61. Punto 3 de muestreo: Salida del filtro percolador

- **Punto 4 y 5: Salida de la torre izquierda y derecha del Keisya**

Los puntos 4 y 5 de muestreo son los que se realizan a la salida del filtro biológico Keisya, el cual cuenta con dos torres y cada una de estas con una tubería de salida a la que se les denomina torre 1 a la izquierda y torre a la 2 derecha vistas desde la zona frontal del sistema.

Como se observa en la Figura 62 las tuberías de salida del sistema Keisya se encuentran junto a la salida del filtro percolador en la entrada del sedimentador secundario.

El propósito de la toma de estas muestras consiste en analizar el rango de efectividad del sistema de filtro biológico al tratar las aguas residuales provenientes del reactor UASB.

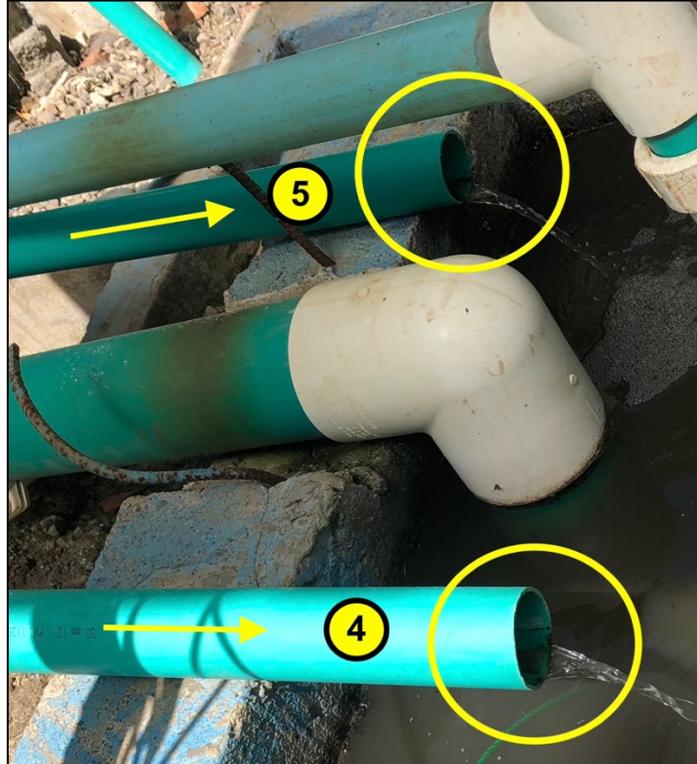


Figura 62. Punto 4 y 5 de muestreo: torres del sistema Keisya

- **Punto 6: Salida de la PTAR**

El punto 6 de muestreo se realiza a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales, lo que permite conocer las condiciones de vertido de la planta hacia el cuerpo de agua, verificando así el cumplimiento del Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales.

La muestra es recolectada de la tubería que se muestra en la Figura 63 la cual se localiza en la salida del filtro de carbón activado como último proceso de la PTAR.



Figura 63. Punto 6 de muestreo: Salida PTAR

CAPÍTULO 7. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio y el cálculo de parámetros importantes para el funcionamiento del filtro biológico tipo Keisya ubicado de forma experimental dentro de la PTAR Santa Cecilia de Puriscal. Estos resultados se presentan por medio de cuadros, gráficos de cajas y gráficos de dispersión.

Para la ejecución del proyecto se realizaron pruebas de laboratorio a las muestras de aguas residuales provenientes de la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal y la planta piloto tipo Keisya como se muestra en el *Capítulo 6. Materiales y Procedimientos*.

Es importante destacar que las pruebas realizadas en este proyecto consistieron en el cambio del caudal de entrada al sistema Keisya para estudiar el comportamiento que esta unidad de tratamiento tiene a distintos caudales (cuatro diferentes caudales). Estos cambios de caudal provocaron que el sistema llegara al fallo y que muchos de los resultados obtenidos sean variantes y fuera del límite de vertido estipulado en la reglamentación nacional, sin embargo, esta investigación brinda información importante del funcionamiento del sistema la cual se presenta en los análisis mostrados a continuación.

Los caudales de estudio fueron aforados de igual forma en cada torre del Keisya, primero se inició con un caudal de 2 L/min para la cual se realizaron seis muestreos, luego se cambió a un caudal de 4 L/min donde a la tercera semana el sistema falló debido a que no se mantuvieron condiciones de funcionamiento aptas para este caudal, además, de un diseño previo para caudales menores donde como unidad de experimentación se quería conocer las condiciones apropiadas de operación.

La forma de falla se presentó con la saturación de las cajas superiores de la estructura en menos de treinta minutos provocando derrames de agua. Además, la entrada de agua del sistema Keisya y del filtro percolador eran provenientes del reactor UASB, compartiendo tubería, por lo que al estar la salida del Keisya antes que la del filtro percolador y con un caudal tan alto provocaba que no llegara agua al filtro percolador influyendo negativamente en el funcionamiento de la PTAR.

Luego se procedió a disminuir el caudal a 3 L/min, para la cual se realizaron cuatro muestreos, finalizando con un caudal de 1 L/min con cuatro muestreos más.

7.1 Resultados de las pruebas de parámetros de control

7.1.1 Potencial de hidrógeno

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de potencial de hidrógeno tomando en cuenta la planta piloto tipo Keisya y las unidades de tratamiento de la PTAR.

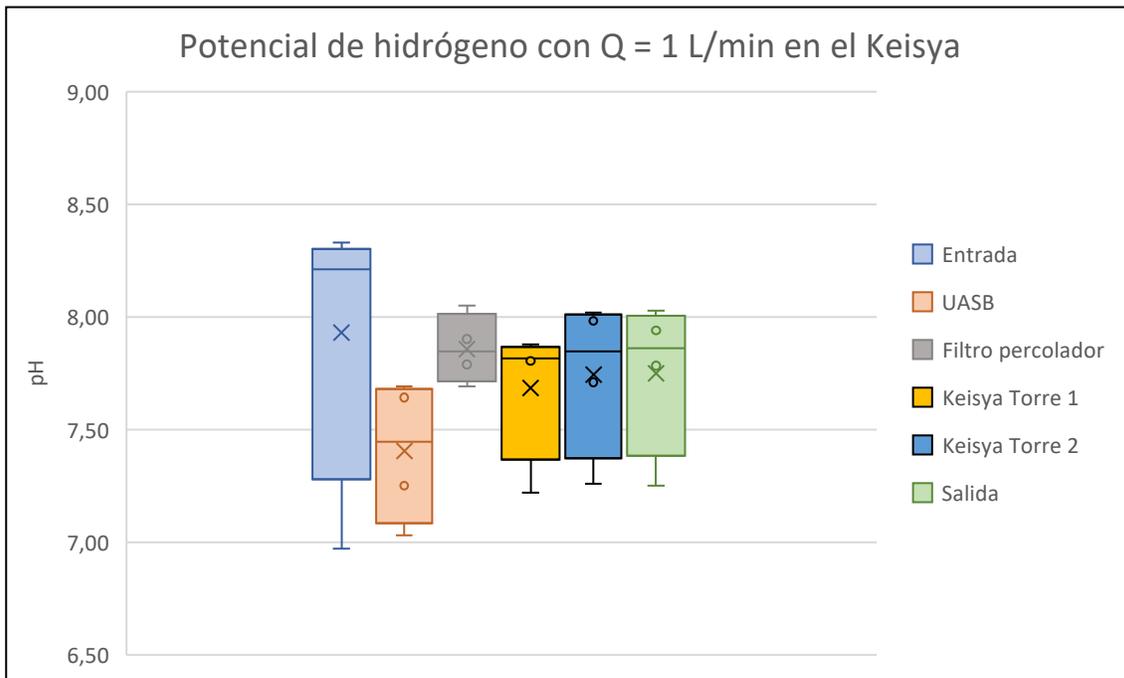


Figura 64. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

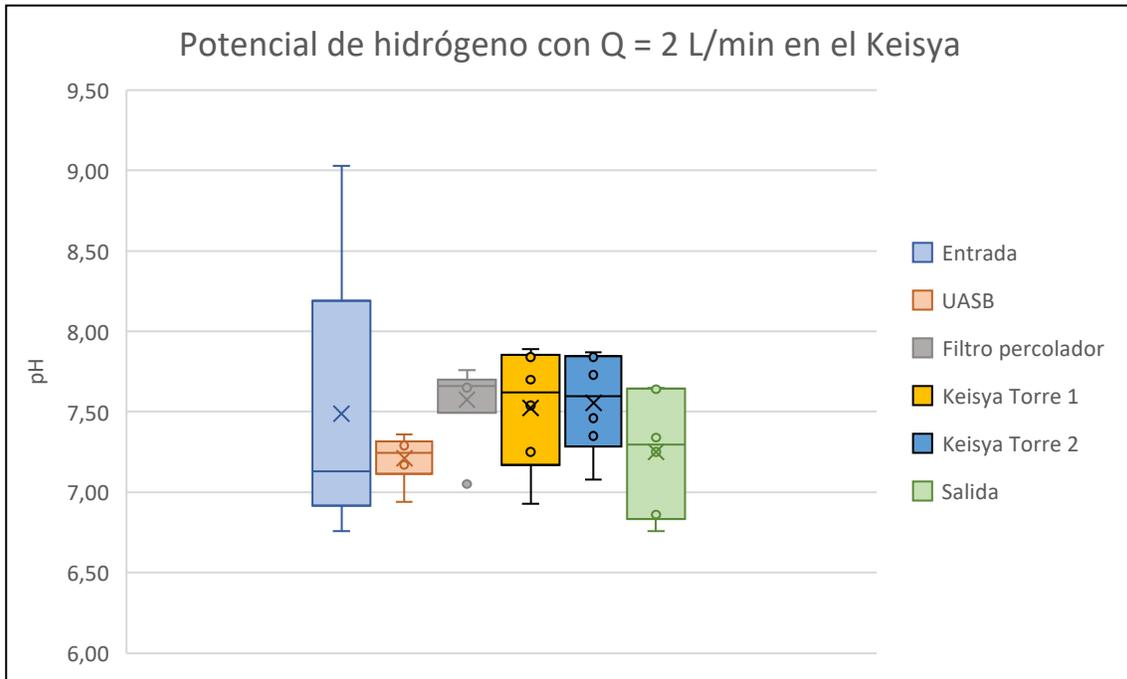


Figura 65. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

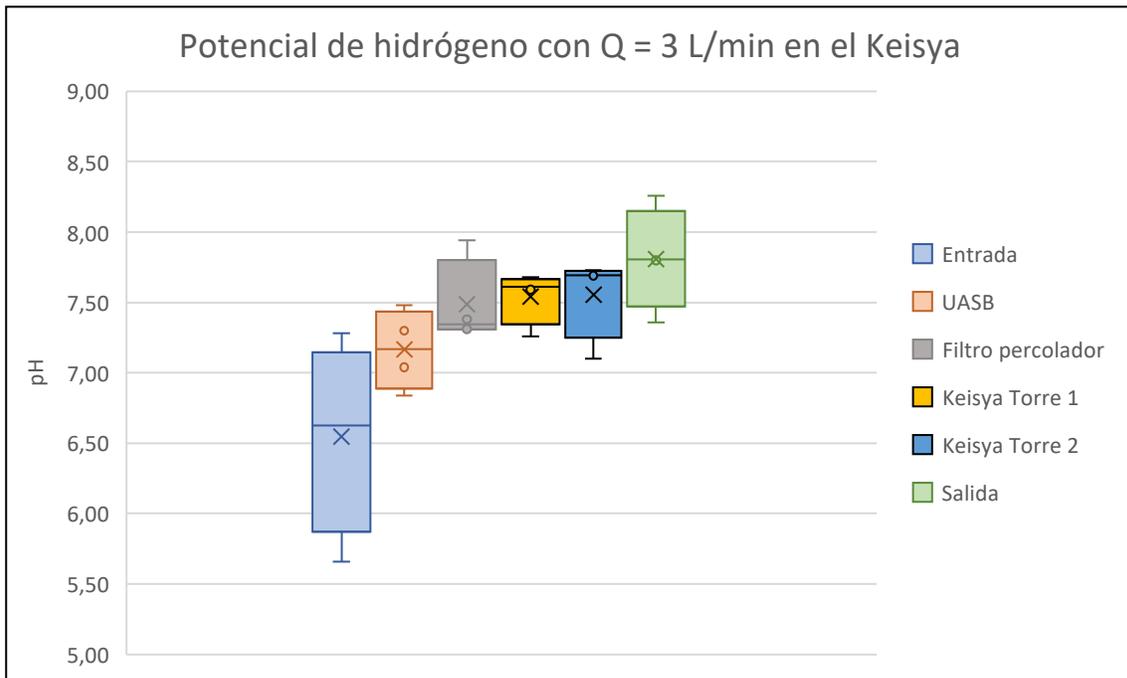


Figura 66. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

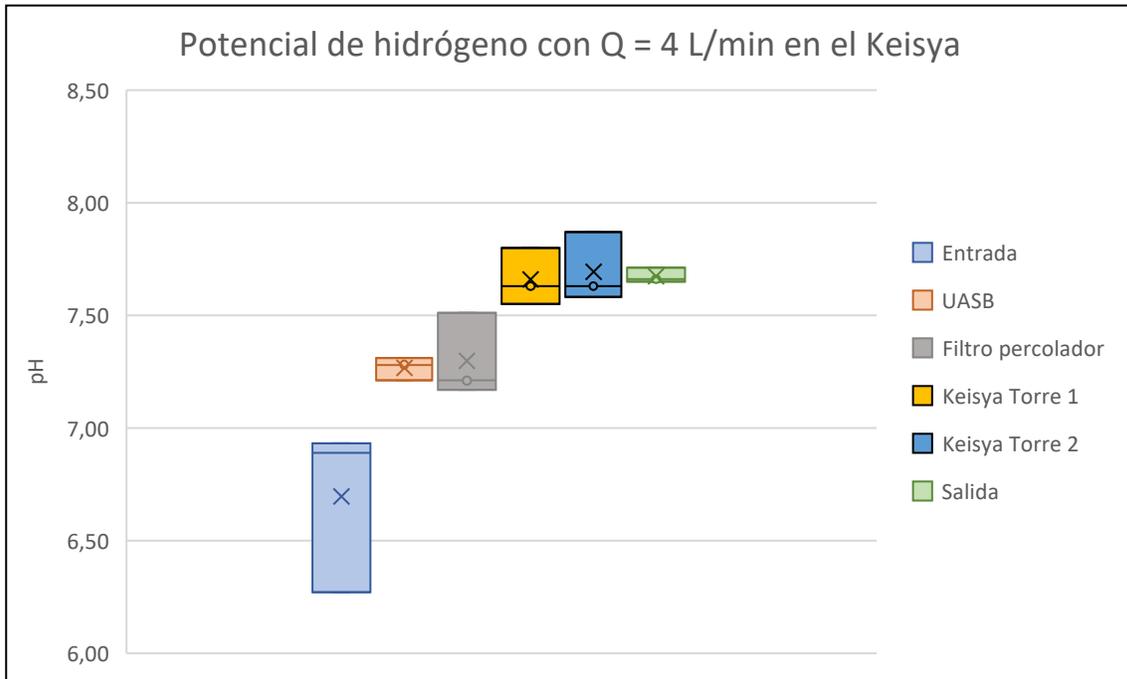


Figura 67. Gráfico de cajas y bigotes del potencial de hidrógeno para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

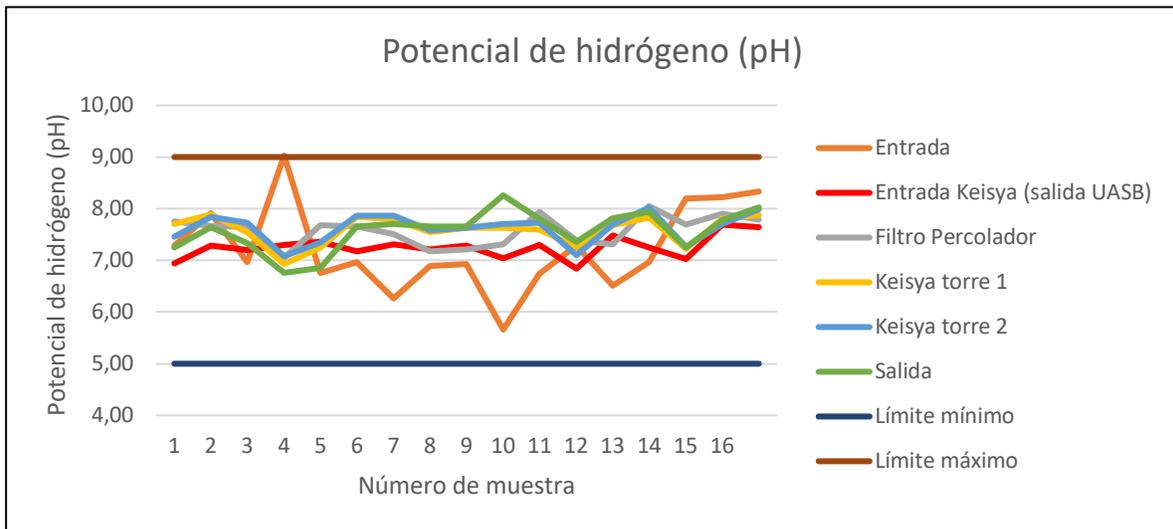


Figura 68. Gráfico de dispersión del pH en todos los puntos medidos

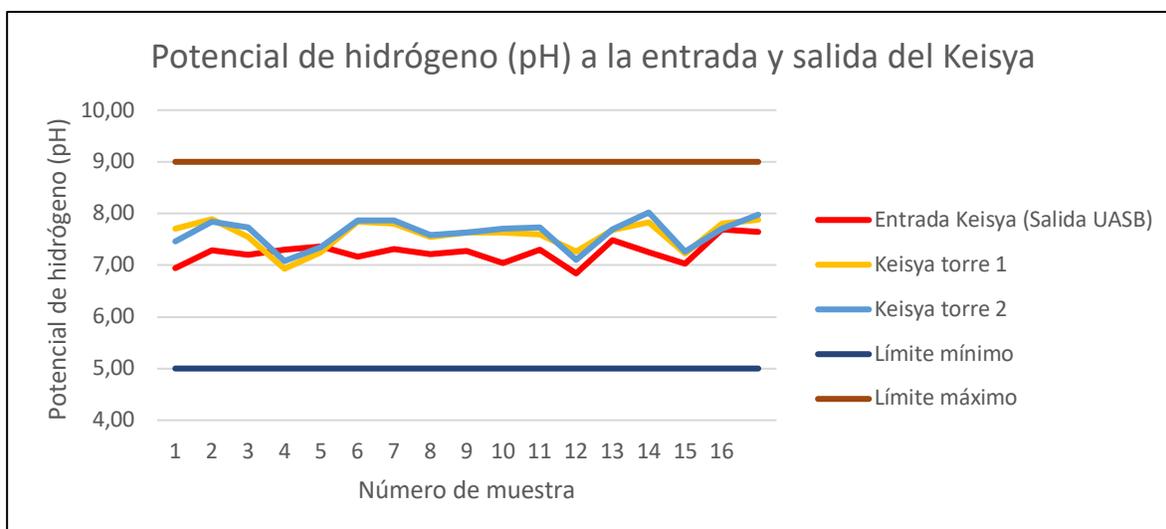


Figura 69. Gráfico de dispersión del pH a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 41. Resumen de valores obtenidos de pH en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR		Salida UASB		Salida Filtro percolador		Salida Keisya Izquierdo		Salida Keisya Derecho		Salida PTAR		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	0,31	7,93	0,08	7,40	0,02	7,86	0,07	7,68	0,09	7,74	0,09	7,75	4
2 L/min	0,61	7,49	0,02	7,21	0,06	7,58	0,12	7,53	0,08	7,56	0,12	7,25	6
3 L/min	0,34	6,55	0,06	7,17	0,07	7,49	0,03	7,54	0,07	7,56	0,10	7,81	4
4 L/min	0,09	6,70	0,00	7,27	0,02	7,30	0,01	7,66	0,02	7,69	0,00	7,67	3

Los valores de pH de planta piloto tipo Keisya tienen un comportamiento muy similar a los componentes de la PTAR en todos los muestreos realizados. Se puede observar en el Cuadro 41 que los promedios son muy similares y la varianza solo es levemente mayor a la entrada de la PTAR.

Al comparar el Keisya con el filtro percolador, en los caudales de entrada al Keisya de 1 y 2 L/min (Figura 64 y Figura 65) la mitad de los resultados del filtro percolador son mayores a los de la torre 1 y 2, por lo que la capacidad de remoción del Keisya es mejor comparada con el filtro.

Con respecto a los caudales de entrada al Keisya de 3 y 4 L/min (Figura 66 y Figura 67) la mitad de los valores del filtro percolador son menores a los del Keisya, por lo que este tiene menor remoción.

7.1.2 Conductividad

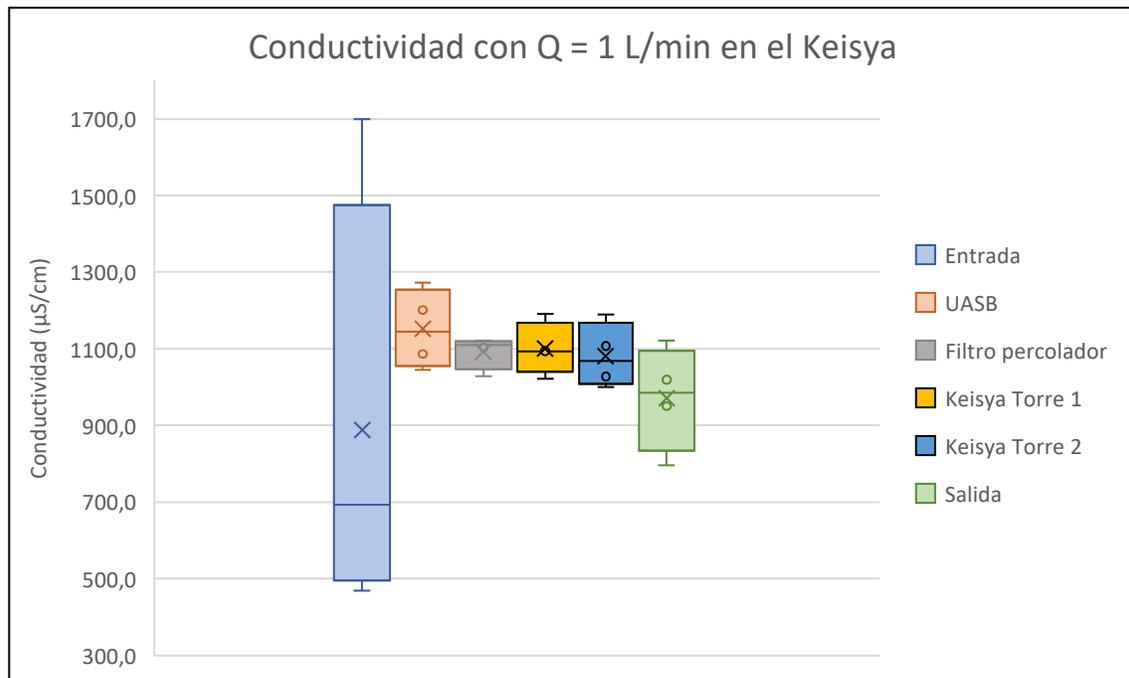


Figura 70. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min

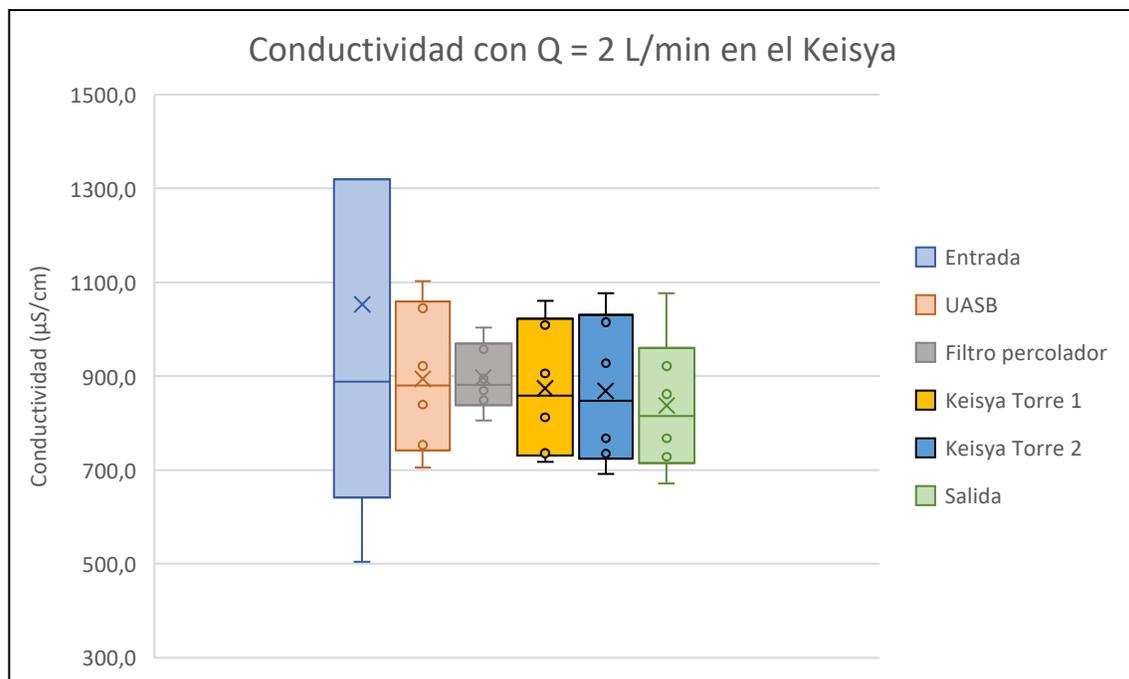


Figura 71. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min

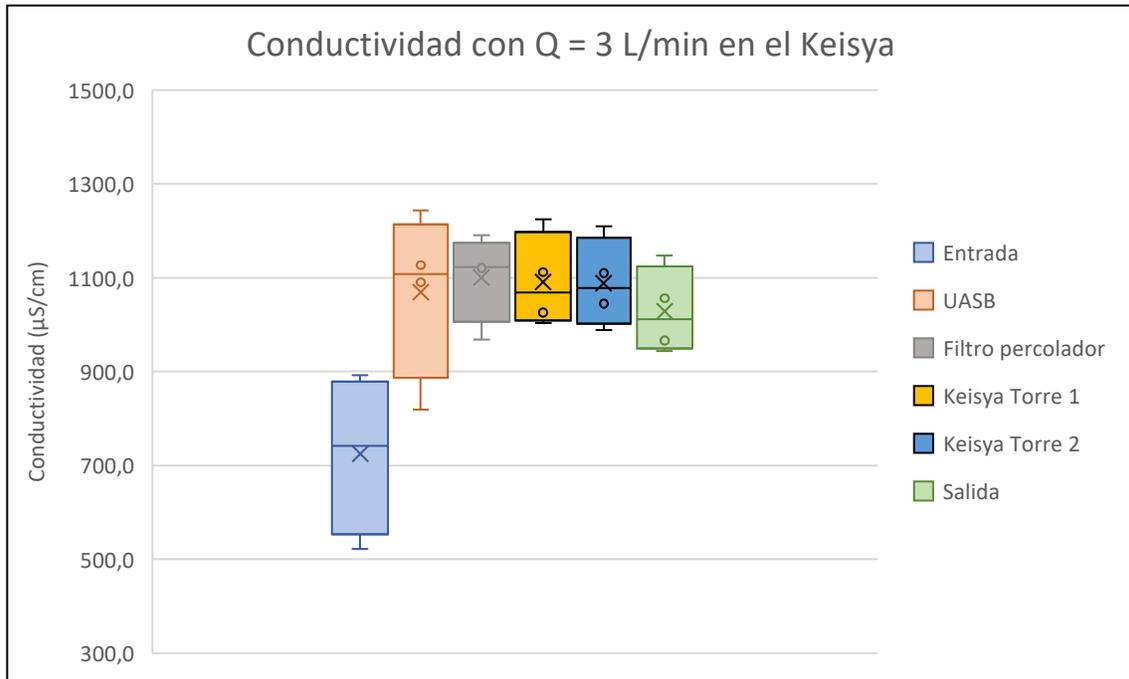


Figura 72. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min

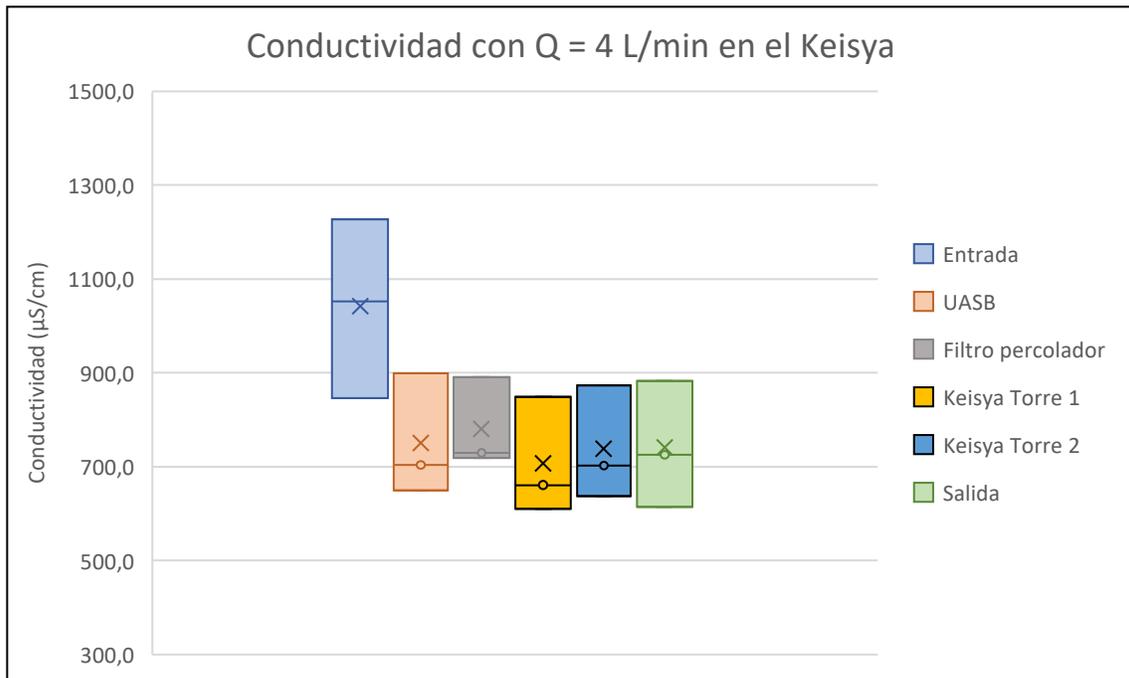


Figura 73. Gráfico de cajas y bigotes de la conductividad para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min

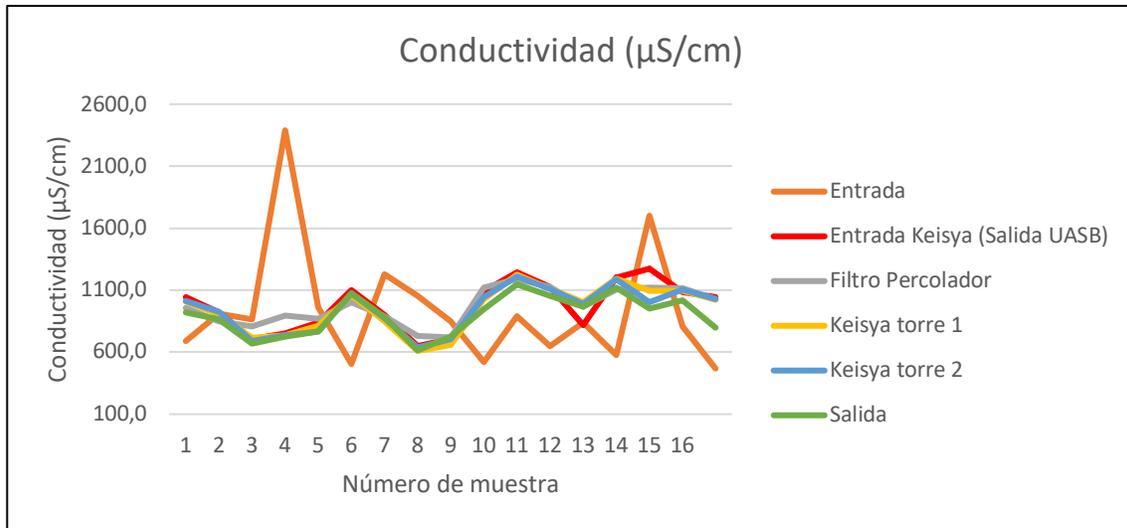


Figura 74. Gráfico de dispersión de la conductividad en todos los puntos medidos

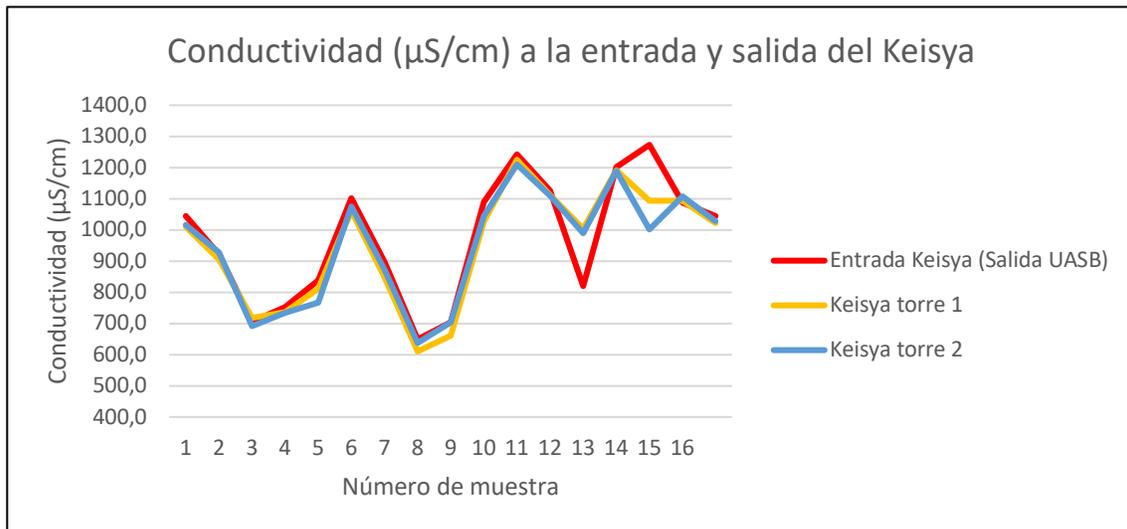


Figura 75. Gráfico de dispersión de la conductividad a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 42. Resumen de valores obtenidos de conductividad eléctrica en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (µS/cm)		Salida UASB (µS/cm)		Salida Filtro percolador (µS/cm)		Salida Keisya Izquierdo (µS/cm)		Salida Keisya Derecho (µS/cm)		Salida PTAR (µS/cm)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	234132,07	888,08	8178,75	1151,50	1408,50	1092,00	3654,75	1100,50	5387,19	1081,25	13976,35	971,65	4
2 L/min	380488,58	1053,23	20871,43	894,33	4437,60	896,50	16964,48	873,40	21211,69	868,75	18170,73	837,67	6
3 L/min	21875,21	724,38	24132,15	1069,78	6659,81	1100,95	7591,25	1091,50	6779,17	1088,38	6456,09	1028,30	4
4 L/min	24168,70	1041,87	11449,40	750,43	6192,65	779,77	10511,48	706,63	9884,12	737,73	12089,25	740,70	3

Los valores obtenidos de conductividad eléctrica en la PTAR oscilan entre 706,63 µS/cm y los 1151,50 µS/cm, presentando el menor valor en la salida de la torre

izquierda del Keisya cuando se le aplica el caudal de 4 L/min y el mayor valor en la salida del UASB.

Sin embargo, se puede observar que los valores de la varianzas son muy elevadas en todos los componentes de la PTAR y en la planta piloto tipo Keisya, lo que permite decir que la variabilidad de los datos medidos con respecto a la media de estos es muy elevada.

Con los gráficos presentados anteriormente se puede observar que la mayor varianza la presentan los valores medidos a la entrada a la PTAR, donde las condiciones del agua residual se ve influenciada por las actividades humanas y la presencia de precipitaciones debido a las fugas. Mientras que los demás componentes de la PTAR y el Keisya presentan valores promedios muy similares y una variabilidad menor con respecto a su media como se observa en los gráficos de cajas.

7.1.3 Sólidos disueltos totales

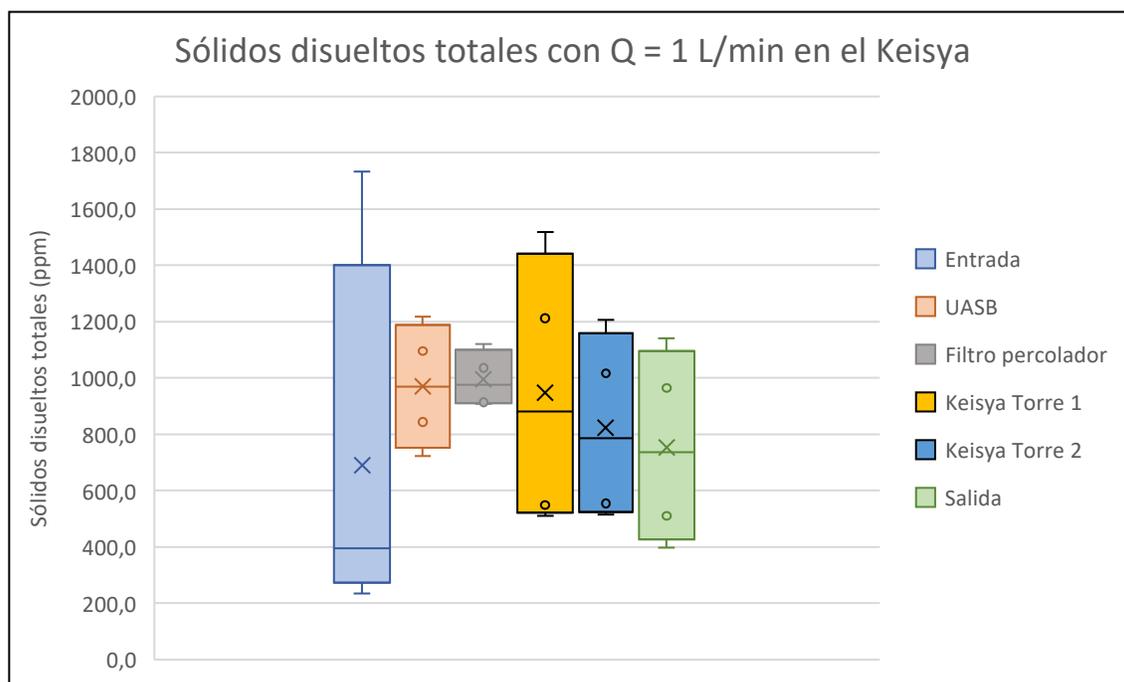


Figura 76. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min

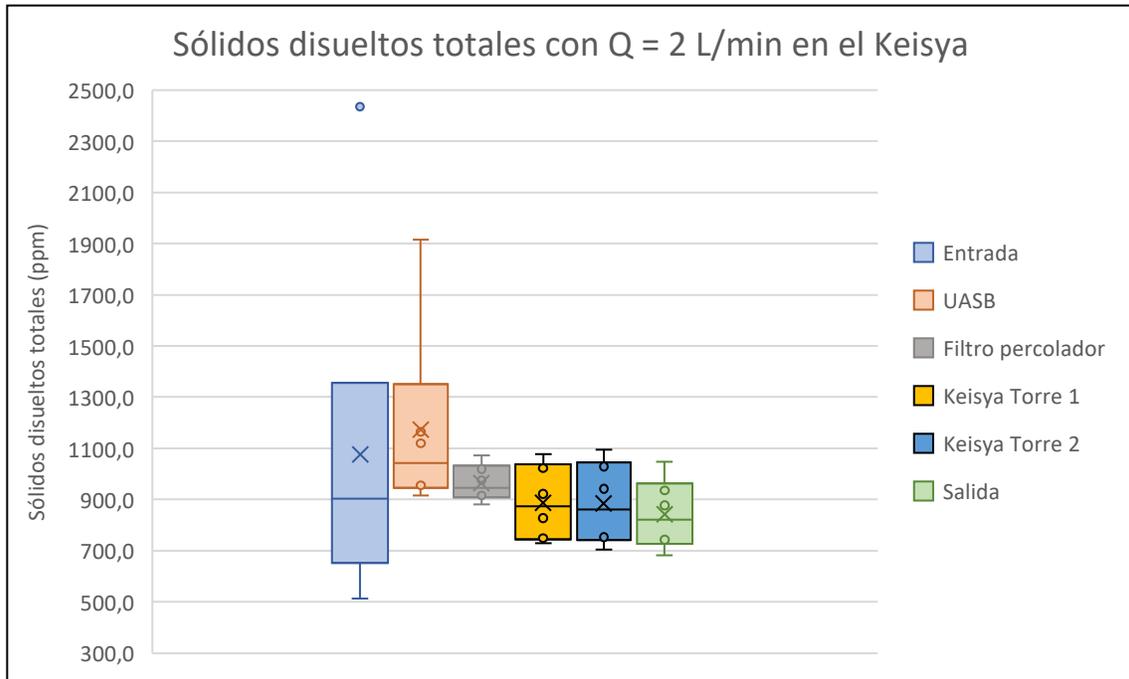


Figura 77. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min

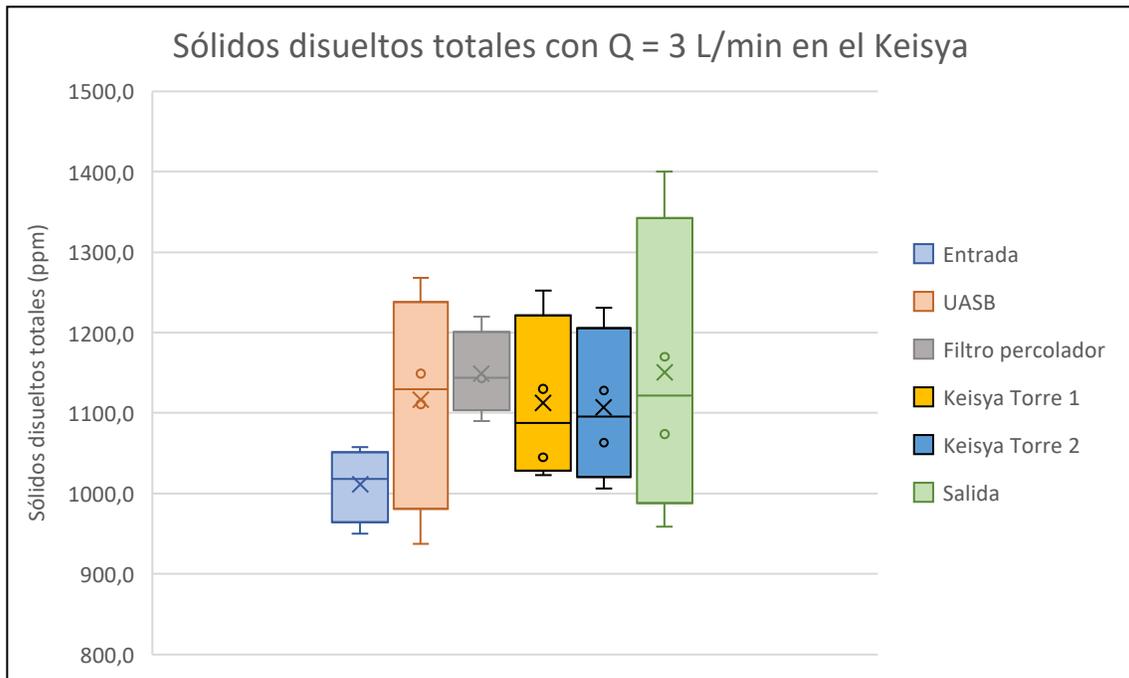


Figura 78. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min

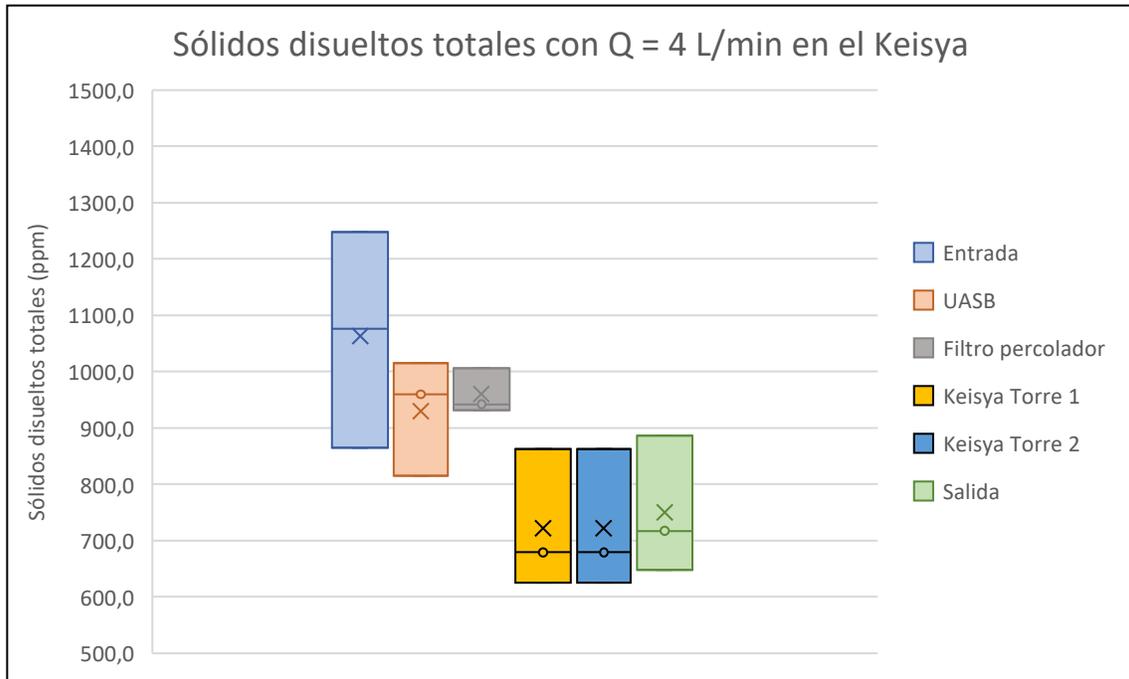


Figura 79. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos disueltos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min

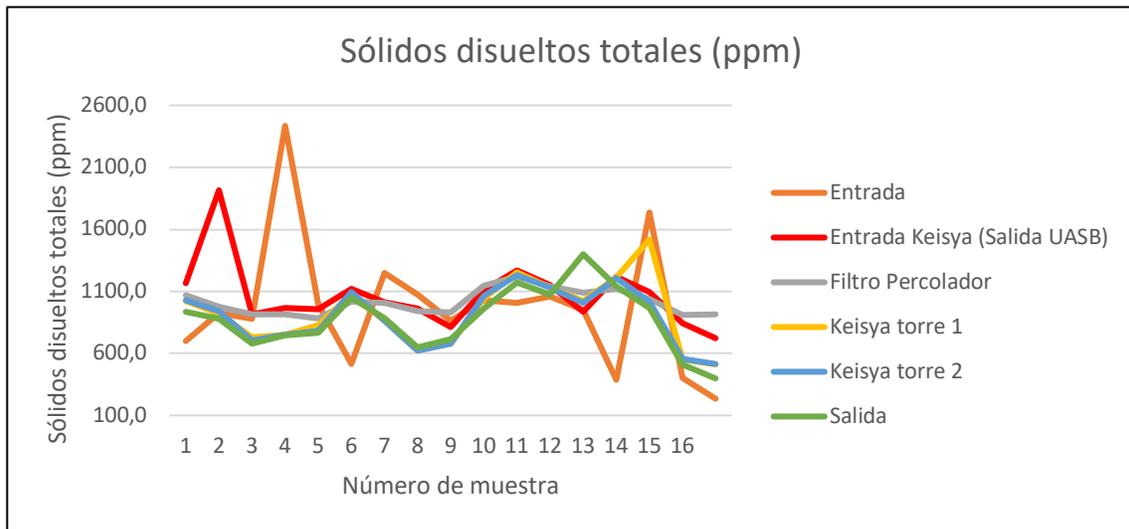


Figura 80. Gráfico de dispersión de los sólidos disueltos totales en todos los puntos medidos

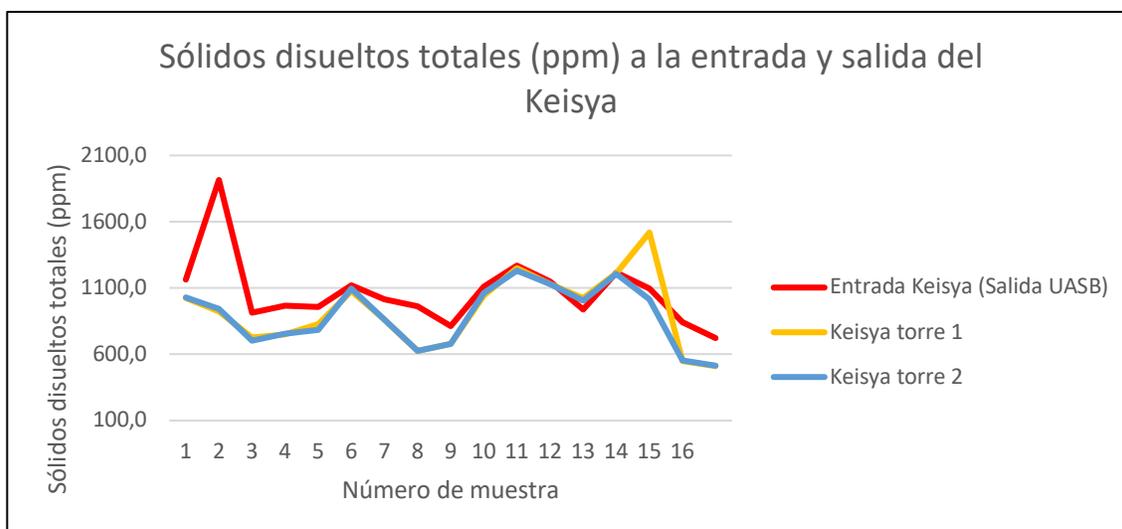


Figura 81. Gráfico de dispersión de los sólidos disueltos totales a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 43. Resumen de valores obtenidos de sólidos disueltos totales en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (ppm)		Salida UASB (ppm)		Salida Filtro percolador (ppm)		Salida Keisya Izquierdo (ppm)		Salida Keisya Derecho (ppm)		Salida PTAR (ppm)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	368045,78	689,40	38609,18	969,73	7917,35	994,78	186594,52	947,60	87911,92	822,55	94896,98	753,03	4
2 L/min	395445,71	1075,27	118287,88	1172,90	4334,97	963,40	17302,27	888,00	21374,81	884,18	15533,61	841,98	6
3 L/min	1582,99	1011,13	14010,98	1116,40	2148,65	1149,23	8083,25	1112,50	6988,50	1107,00	26288,69	1150,75	4
4 L/min	24598,72	1062,83	7128,35	929,53	1063,11	959,67	10367,30	722,03	10367,30	722,03	10027,98	750,23	3

En el cuadro anterior se puede observar la variabilidad que presentan los resultados de sólidos disueltos totales a la entrada de la PTAR, pero estos valores se van regulando conforme ingresan a los sistemas de tratamiento.

El promedio de los valores obtenidos de sólidos disueltos totales están en un rango de los 689,40 ppm a los 1172,90 ppm presentando el valor mínimo a la entrada a la PTAR y el máximo a la salida del UASB.

En la mayoría de los casos a la entrada a la PTAR tiene un valor promedio menor que la salida UASB, sin embargo, después del UASB los sólidos disueltos totales tienden a disminuir su concentración, aunque los resultados son muy variables.

7.1.4 Oxígeno disuelto

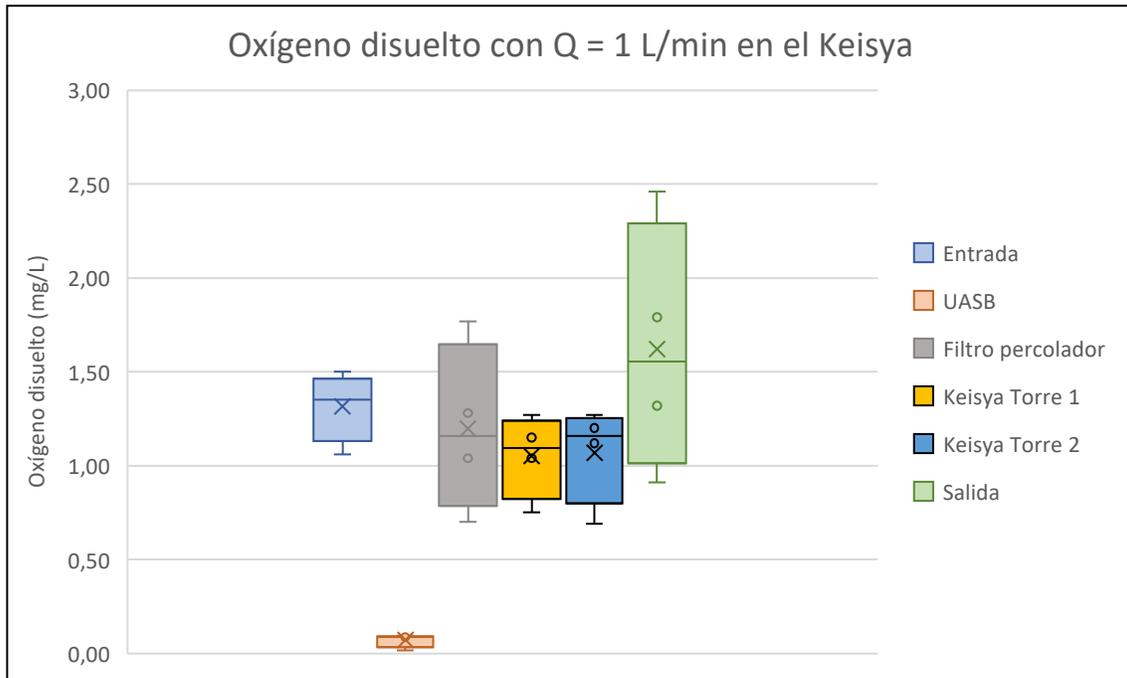


Figura 82. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min

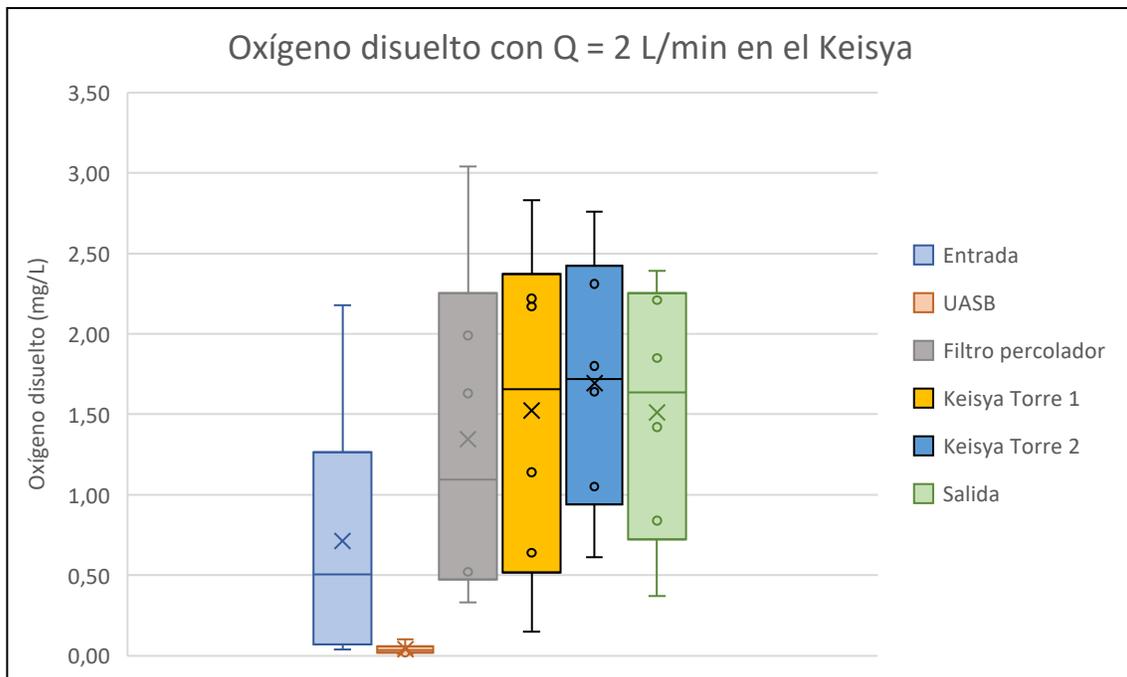


Figura 83. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min

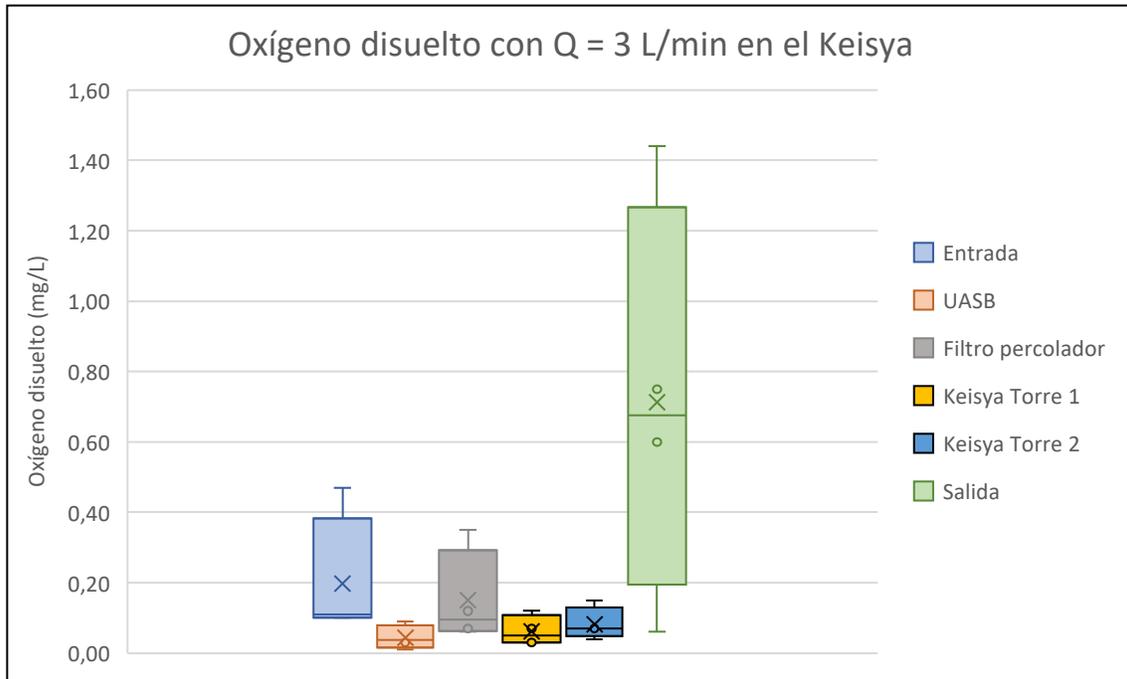


Figura 84. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 3L/min

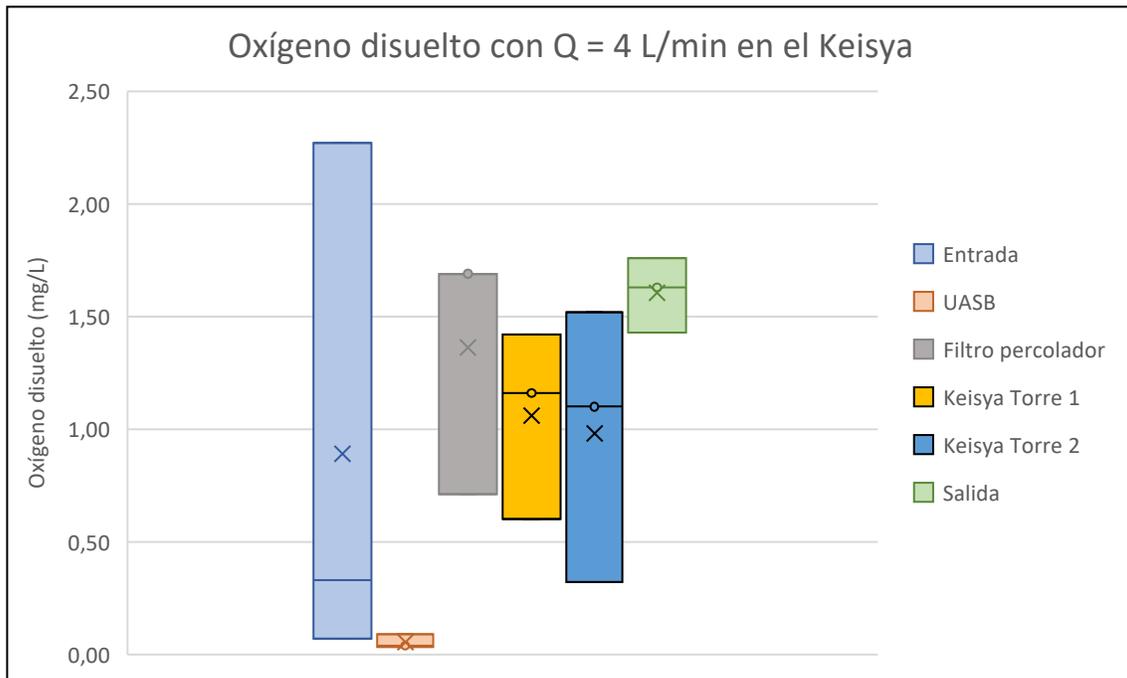


Figura 85. Gráfico de cajas y bigotes de oxígeno disuelto para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min

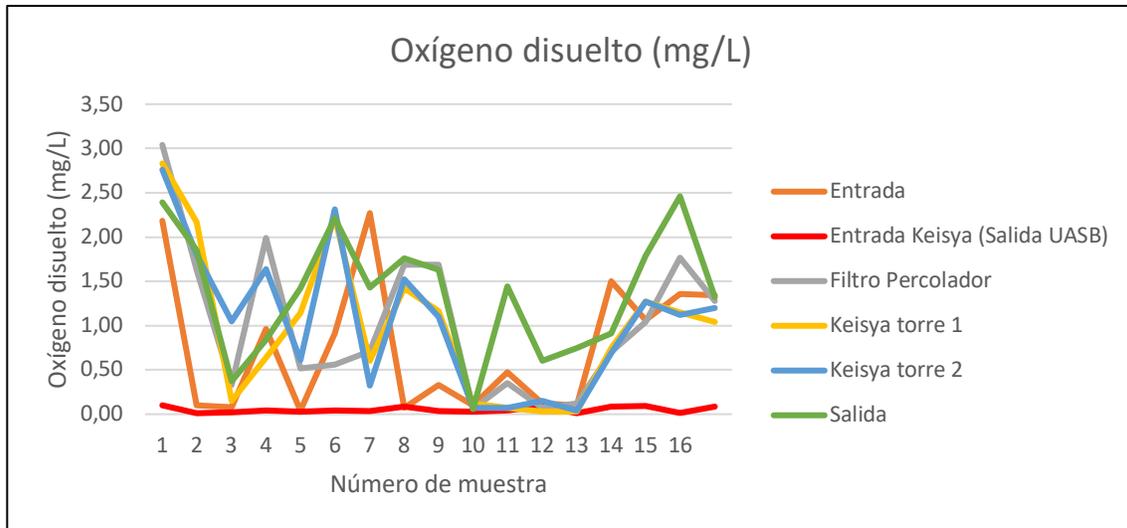


Figura 86. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto en todos los puntos medidos

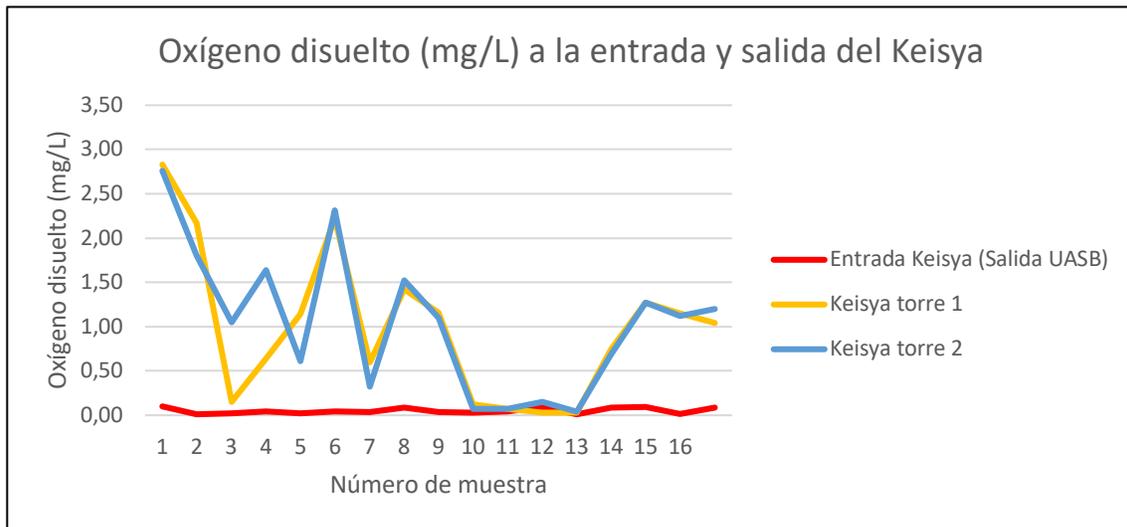


Figura 87. Gráfico de dispersión de oxígeno disuelto a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 44. Resumen de valores obtenidos de oxígeno disuelto en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	0,03	1,32	0,00	0,07	0,15	1,20	0,04	1,05	0,05	1,07	0,33	1,62	4
2 L/min	0,58	0,71	0,00	0,04	0,95	1,35	0,90	1,53	0,52	1,70	0,52	1,51	6
3 L/min	0,02	0,20	0,00	0,04	0,01	0,15	0,00	0,06	0,00	0,08	0,24	0,71	4
4 L/min	0,96	0,89	0,00	0,05	0,21	1,36	0,12	1,06	0,25	0,98	0,02	1,61	3

Tanto en el cuadro anterior como en las figuras de oxígeno disuelto se puede apreciar que los valores promedio de este parámetro en la salida del reactor UASB son bajos con una varianza de 0 mg/L, lo cual es debido a que este es un sistema anaerobio. Contrario sucede con el filtro percolador y la planta piloto tipo Keisya, los cuales son aerobio y por lo tanto se puede observar un aumento de los valores promedio de oxígeno disuelto en las aguas residuales.

En términos generales el promedio de los valores de oxígeno disuelto va de 0,04 mg/L en la entrada al Keisya (salida UASB) a los 1,70 mg/L en la salida de la torre derecha del Keisya, lo que ejemplifica el aumento del oxígeno disuelto de un sistema anaeróbico a uno aeróbico.

7.2 Resultados de las pruebas de nutrientes: nitrito, nitrato, nitrógeno amoniacal y fósforo

7.2.1 Nitrito

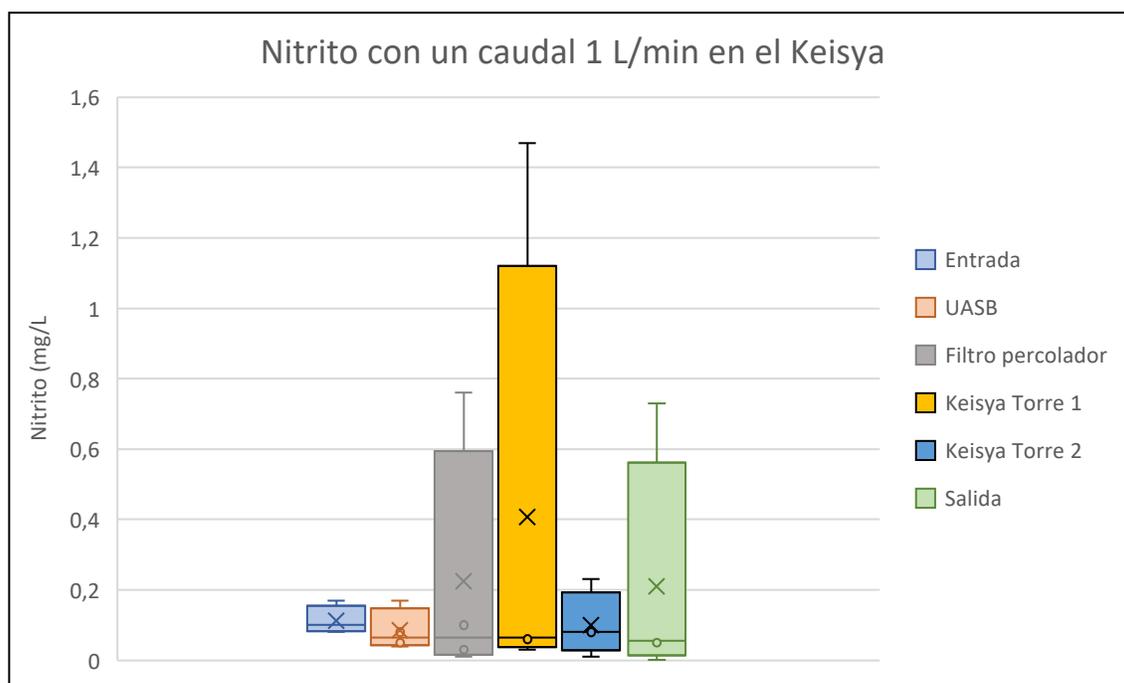


Figura 88. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

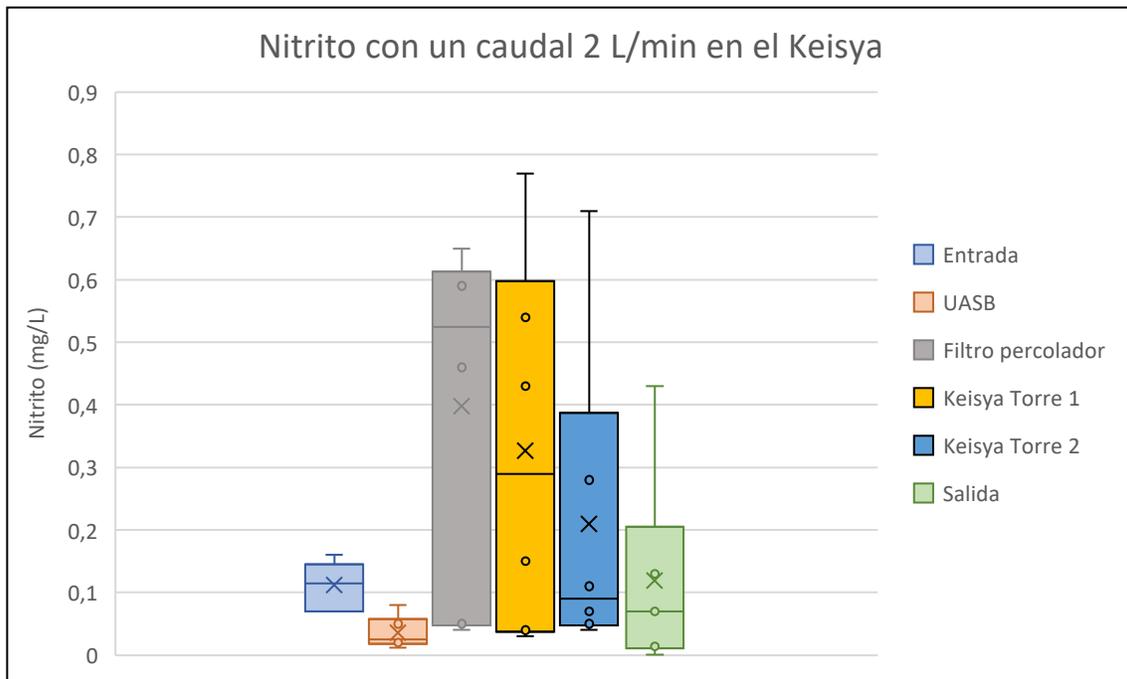


Figura 89. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

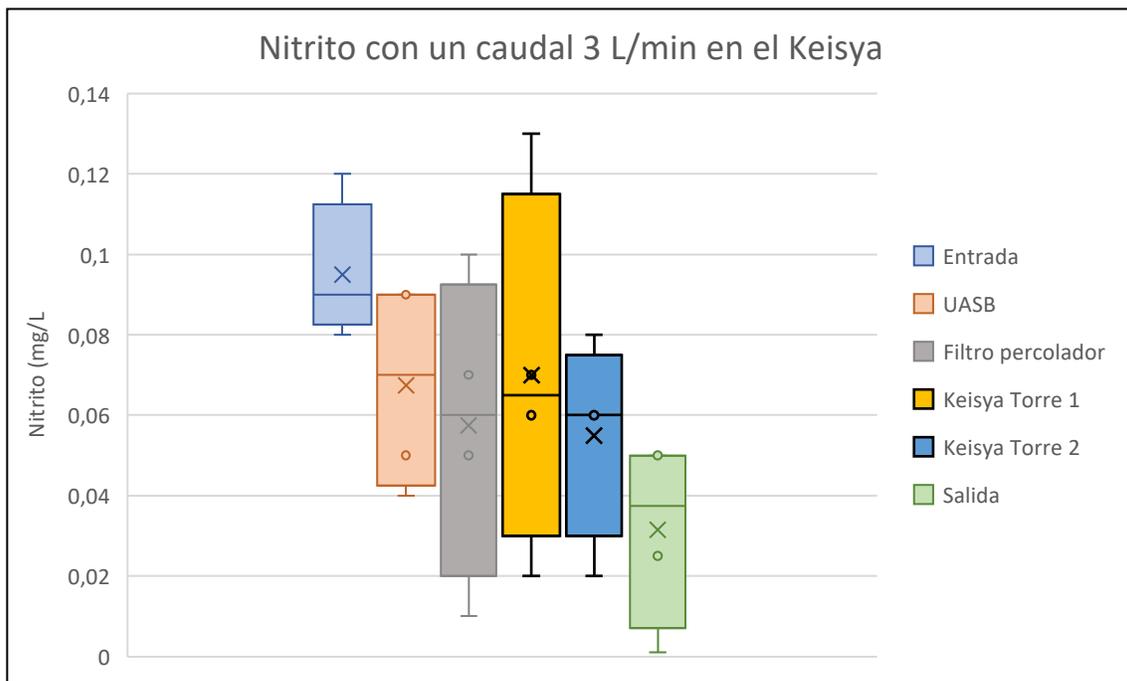


Figura 90. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

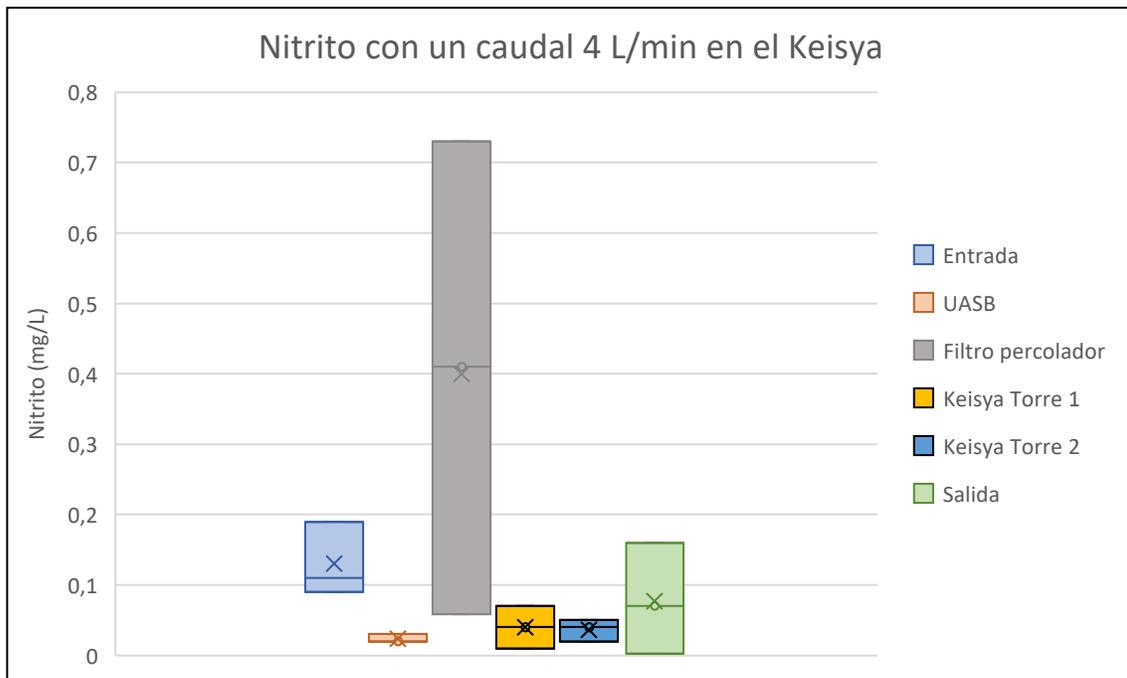


Figura 91. Gráfico de cajas y bigotes de nitrito para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

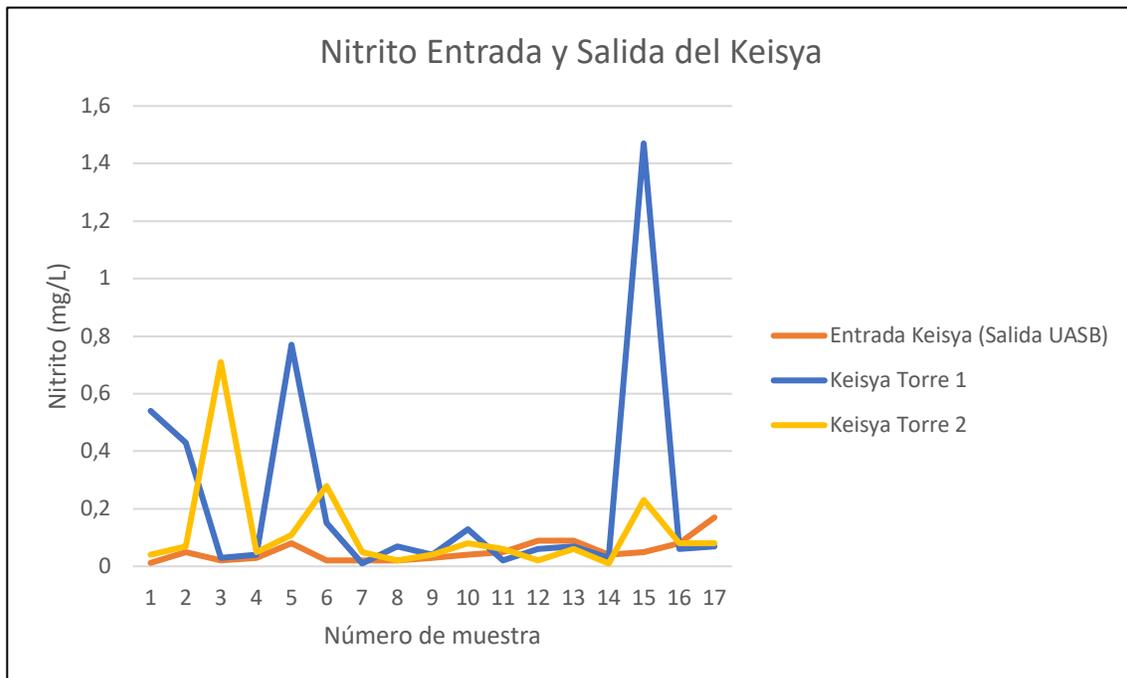


Figura 92. Gráfico de dispersión de nitrito en la entrada y salida del Keisya

Cuadro 45. Resumen de valores obtenidos de nitrito en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	0,001	0,113	0,003	0,085	0,097	0,225	0,377	0,408	0,006	0,100	0,091	0,210	4
2 L/min	0,001	0,112	0,001	0,035	0,066	0,398	0,076	0,327	0,057	0,210	0,021	0,119	6
3 L/min	0,000	0,095	0,001	0,068	0,001	0,058	0,002	0,070	0,000	0,055	0,009	0,088	4
4 L/min	0,002	0,130	0,000	0,023	0,075	0,399	0,001	0,040	0,000	0,037	0,004	0,077	3

Los valores de nitrito obtenidos durante las pruebas fueron bajos, con un rango que va desde los 0,001 mg/L hasta los 1,47 mg/L siendo este último un valor fuera de la mediana la cual es de 0,07 mg/L y del promedio el cual es de 0,15 mg/L.

Los valores de nitrito durante el paso por las unidades tienen la tendencia al aumento, principalmente después de la salida del UASB entrando al filtro percolador y al filtro tipo Keisya. Sin embargo, a la salida los valores se mantienen muy por debajo del valor máximo recomendable de vertido de 1 mg/L, como se menciona anteriormente.

7.2.2 Nitrato

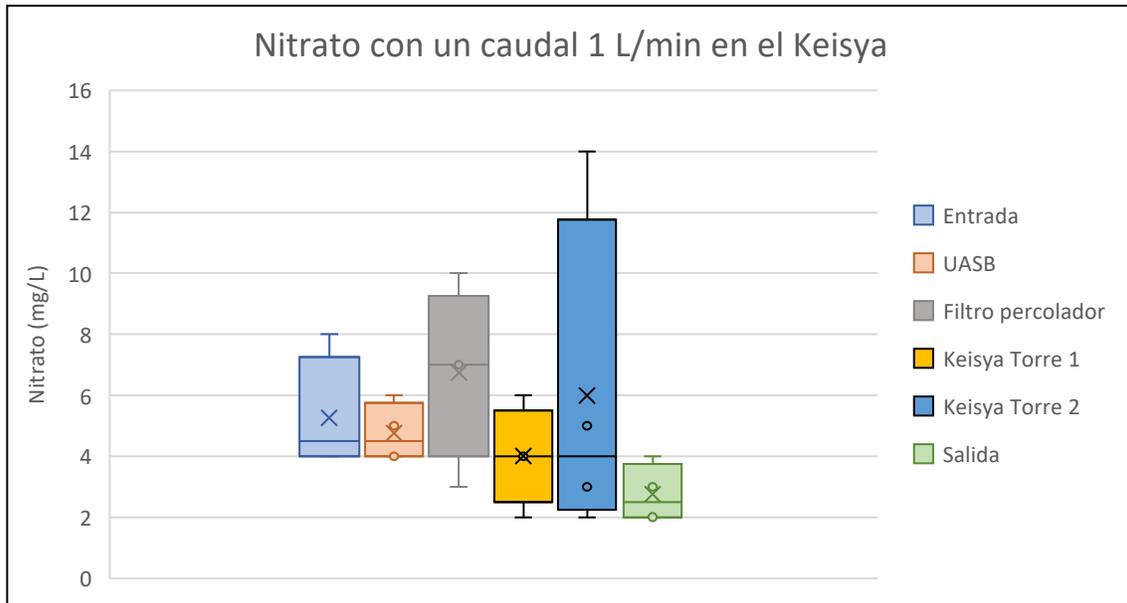


Figura 93. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

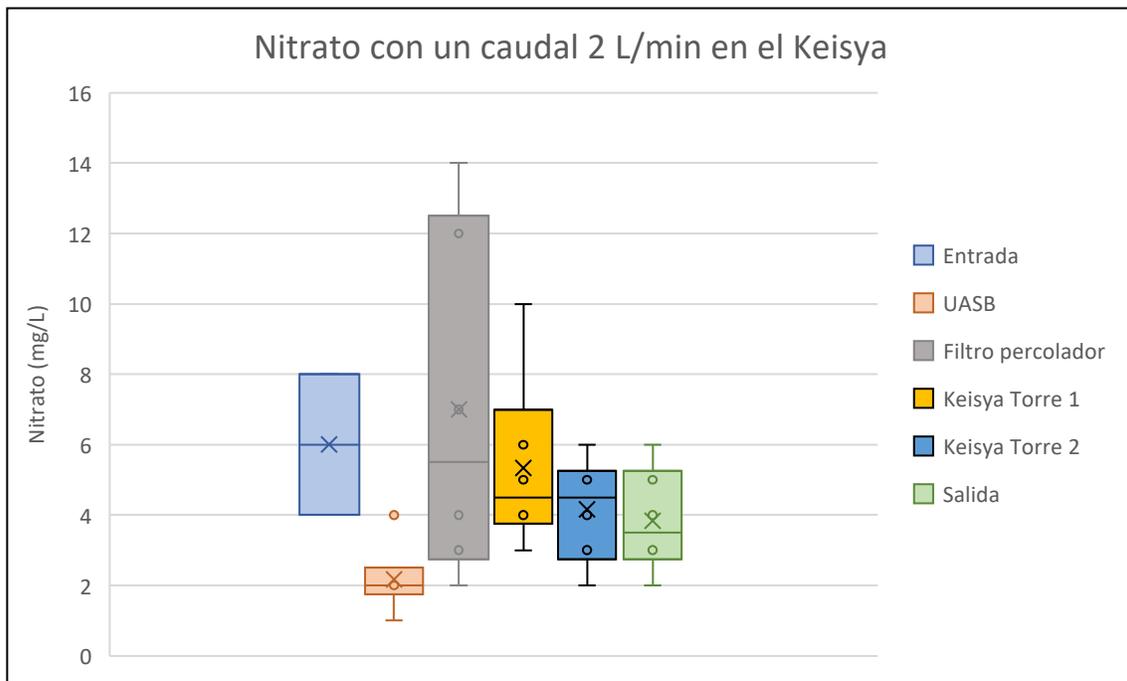


Figura 94. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

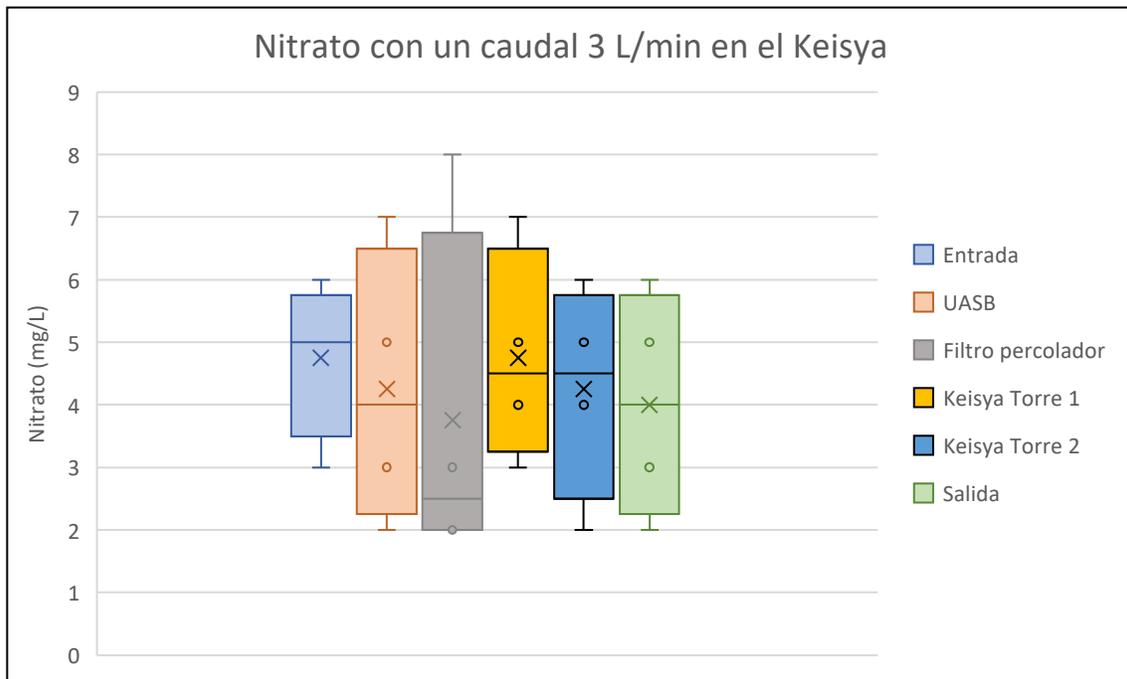


Figura 95. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

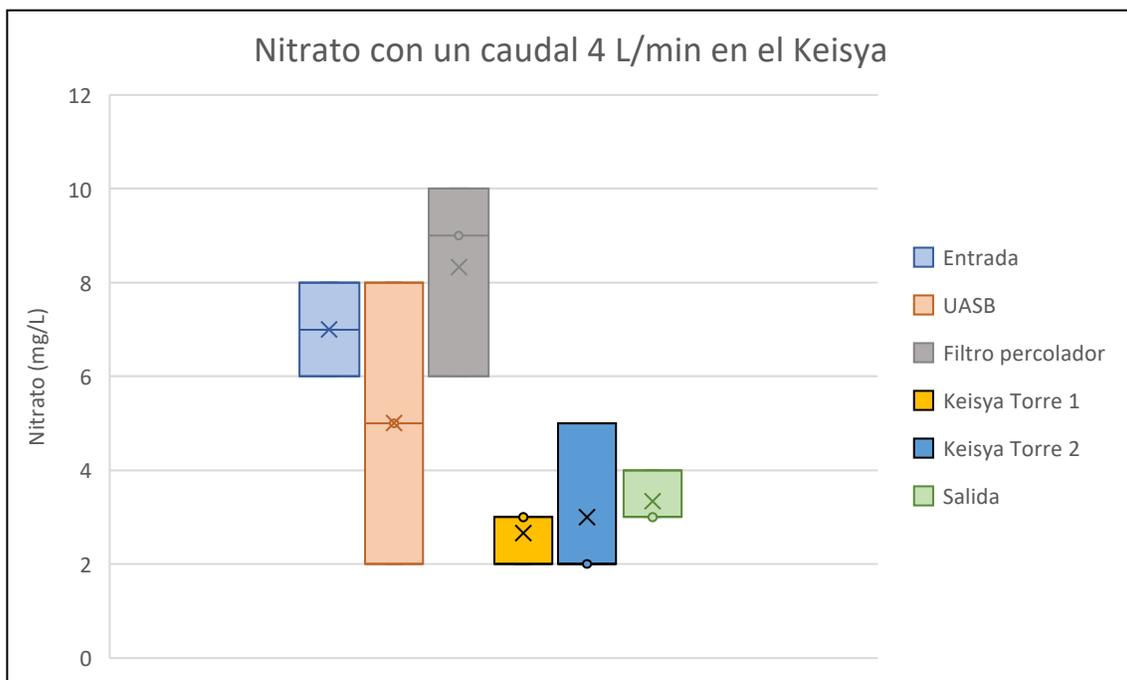


Figura 96. Gráfico de cajas y bigotes de nitrato para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

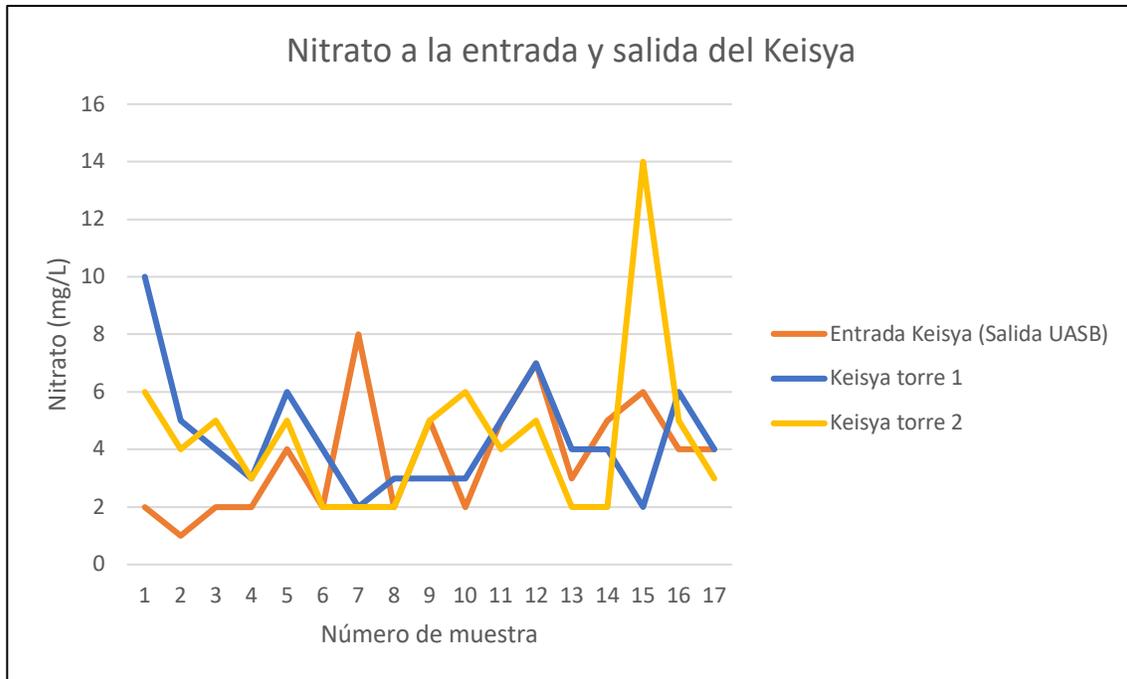


Figura 97. Gráfico de dispersión de nitrato a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 46. Resumen de valores obtenidos de nitrato en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	2,69	5,25	5,19	6,25	3,19	5,25	2,00	4,00	22,50	6,00	0,69	2,75	4
2 L/min	3,00	6,00	19,81	6,83	15,22	4,67	5,22	5,33	1,81	4,17	3,58	3,50	6
3 L/min	4,69	5,75	14,05	5,88	6,19	3,75	2,19	4,75	2,19	4,25	2,50	4,00	4
4 L/min	0,67	7,00	6,00	5,00	2,89	8,33	0,22	2,67	2,00	3,00	0,22	3,33	3

En los resultados obtenidos de la investigación se tiene una mediana de 4 mg/L y un promedio de 4,86 mg/L, corroborando los valores bajos de nitrato en las aguas residuales de la PTAR.

Es común observar que los valores de nitrato son mayores en los sistemas de tratamiento aerobios, sin embargo, en este caso el filtro percolador y el Keisya presentan valores menores de nitrato que en el reactor UASB el cual es un proceso anaerobio, lo cual puede deberse a la masa biomasa en estos sistemas aerobios presentó problemas en la creación de nitratos.

Se puede observar que al vertido de las aguas residuales se disminuye la cantidad de nitrato, lo cual es una labor realizada por los sistemas de tratamiento, incluyendo el sedimentador secundario y los estañones de carbón activado, ya que en algunos muestreos las aguas residuales traen consigo altos valores de nitrato al salir del filtro percolador y del Keisya.

7.2.3 Nitrógeno amoniacal

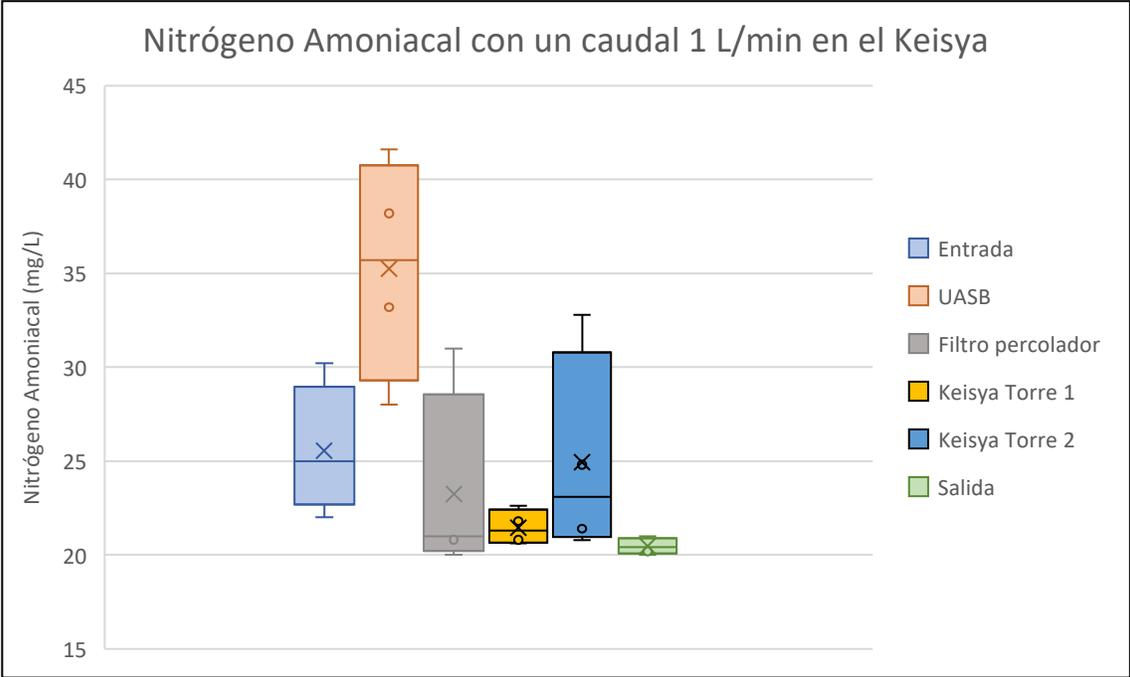


Figura 98. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

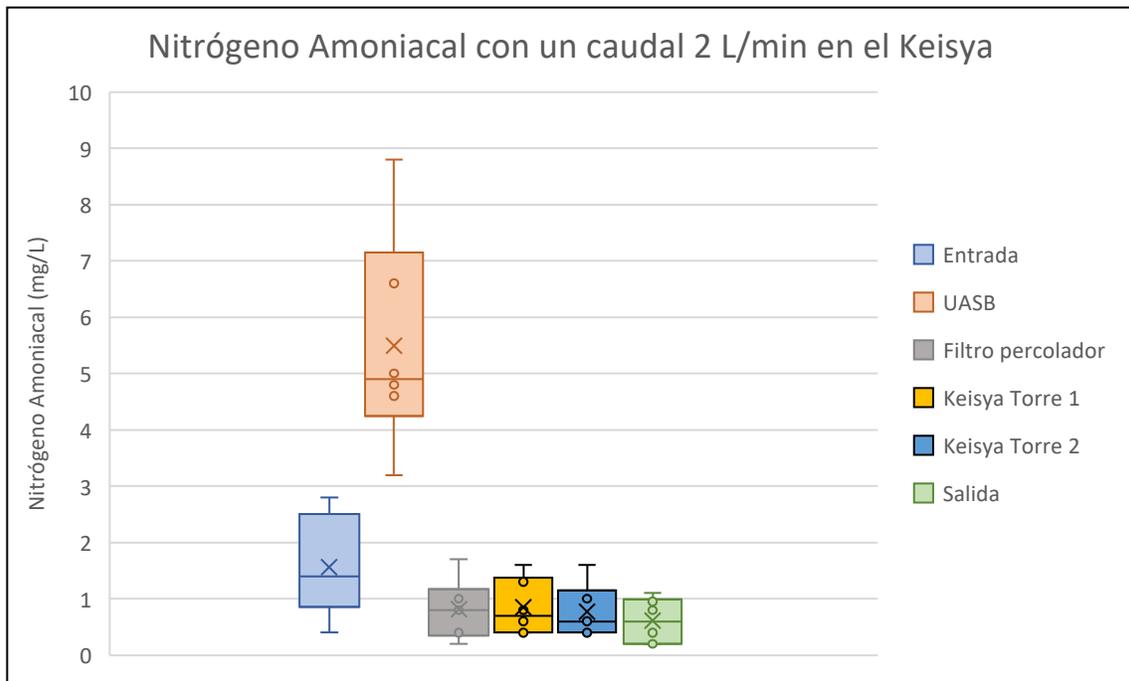


Figura 99. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniaco para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

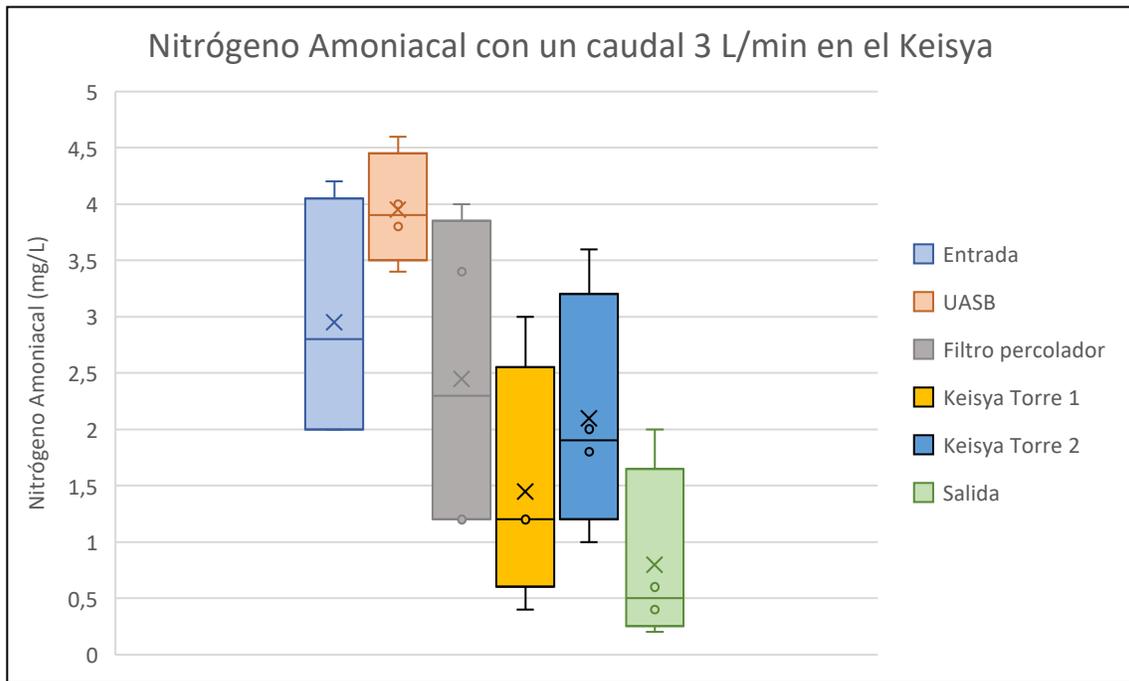


Figura 100. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniaco para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

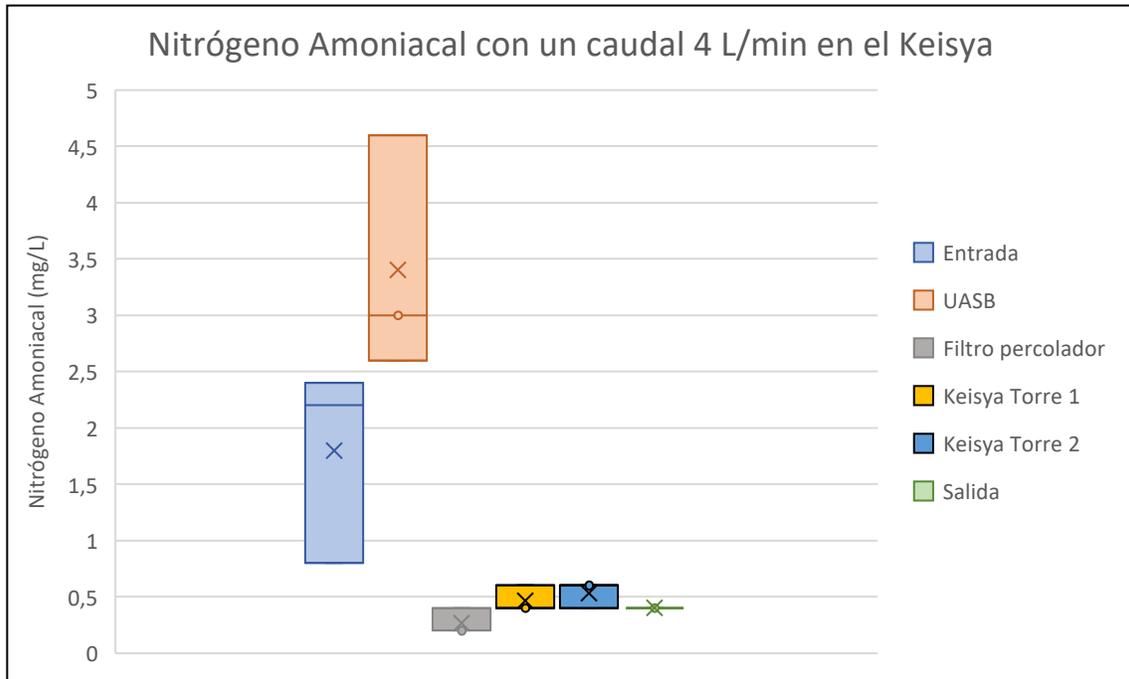


Figura 101. Gráfico de cajas y bigotes de nitrógeno amoniacal para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

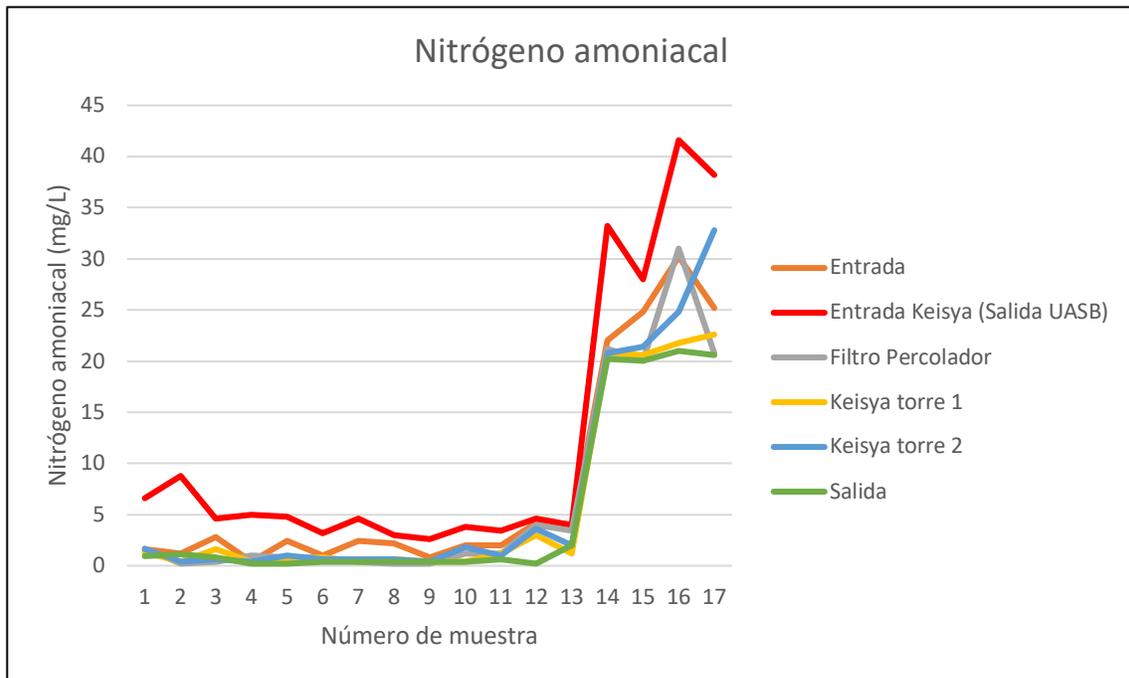


Figura 102. Gráfico de dispersión de nitrógeno amoniacal en todos los puntos de muestreo

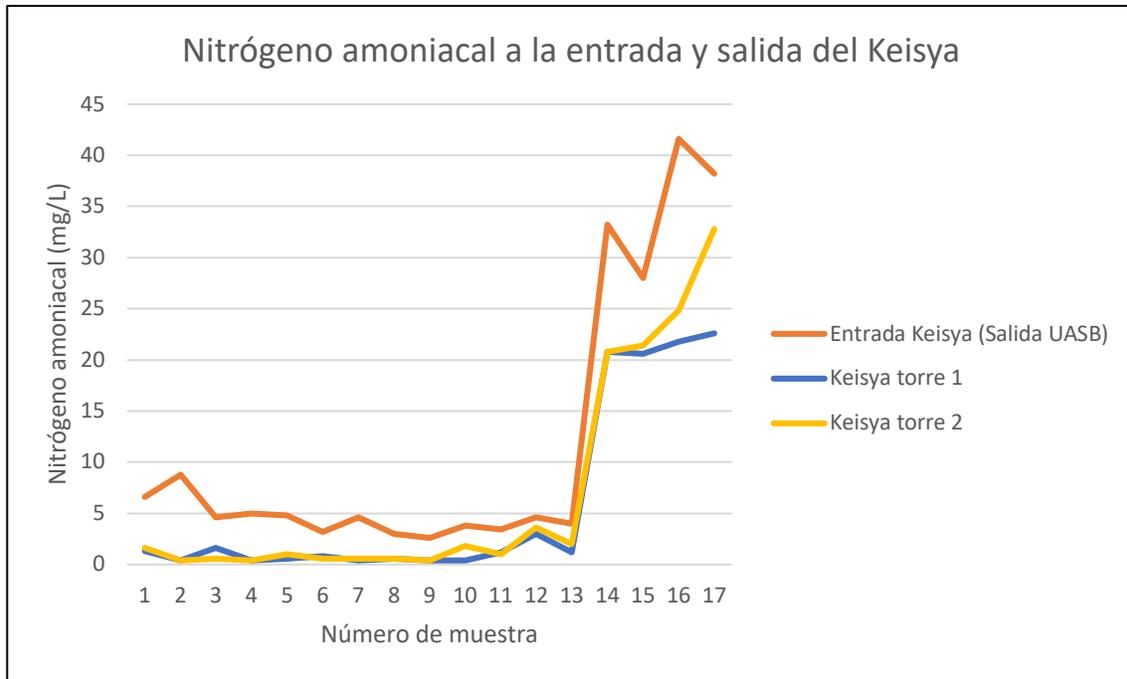


Figura 103. Gráfico de dispersión de nitrógeno amoniacal a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 47. Resumen de valores obtenidos de nitrógeno amoniacal en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	163,23	15,05	377,81	20,50	298,39	17,85	394,69	20,50	305,57	18,45	355,46	18,96	4
2 L/min	0,67	1,57	0,08	0,70	0,23	0,82	0,21	0,85	0,18	0,77	0,13	0,61	6
3 L/min	0,95	2,95	1,89	2,95	1,61	2,45	0,91	1,45	0,89	2,10	0,50	0,80	4
4 L/min	0,51	1,80	0,04	0,73	0,01	0,27	0,01	0,47	0,01	0,53	0,00	0,40	3

Se puede apreciar que los valores más altos de nitrógeno amoniacal en la PTAR son provenientes de la entrada a la PTAR y del reactor UASB, este último debido a que es un sistema anaerobio que presenta el proceso de desnitrificación, contrario al filtro percolador y al Keisya que son procesos aerobios que presentan nitrificación y por esto los valores de nitrógeno amoniacal son menores y los valores de nitrito y nitrato mayores (exceptuando el caso particular de los últimos muestreos mencionados anteriormente).

A pesar de que a la salida del UASB se presentan valores altos de nitrógeno amoniacal, es claro que el filtro biológico tipo Keisya gracias a la nitrificación permite disminuir la concentración de este nutriente presentando valores más bajos.

7.2.4 Fósforo

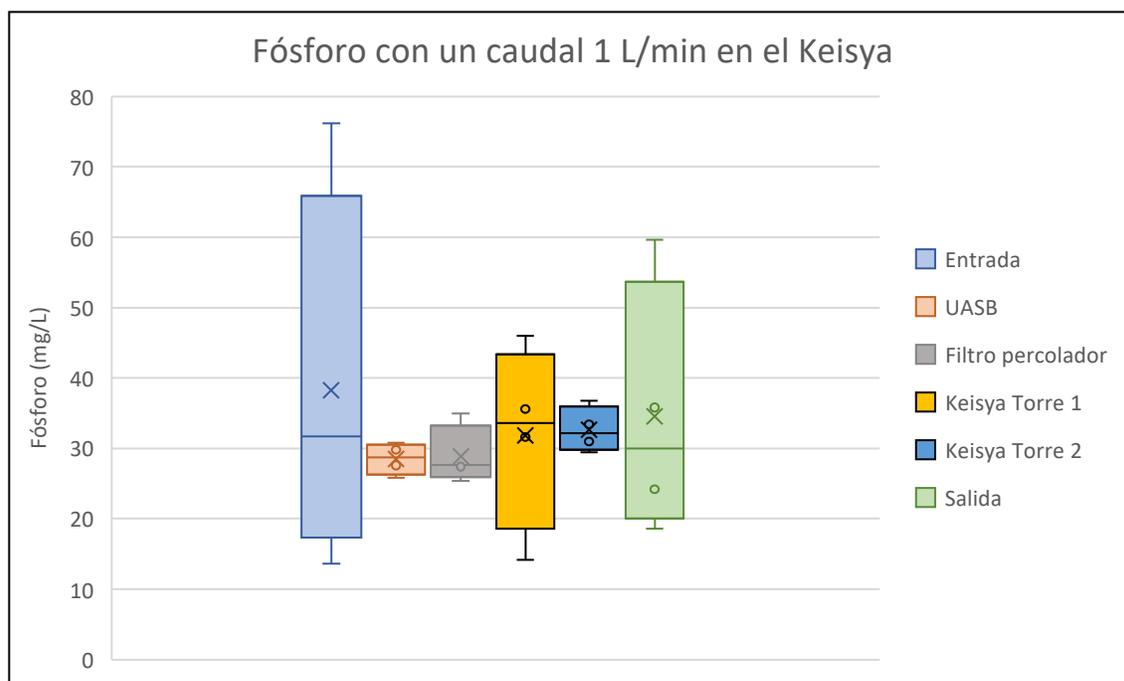


Figura 104. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

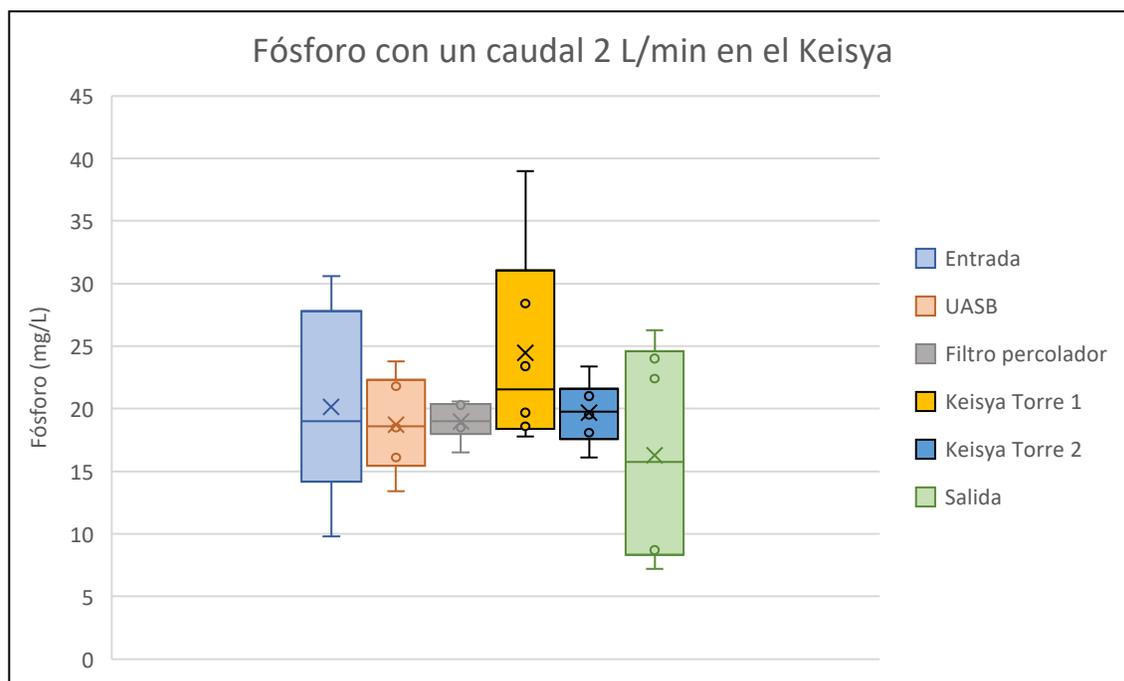


Figura 105. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

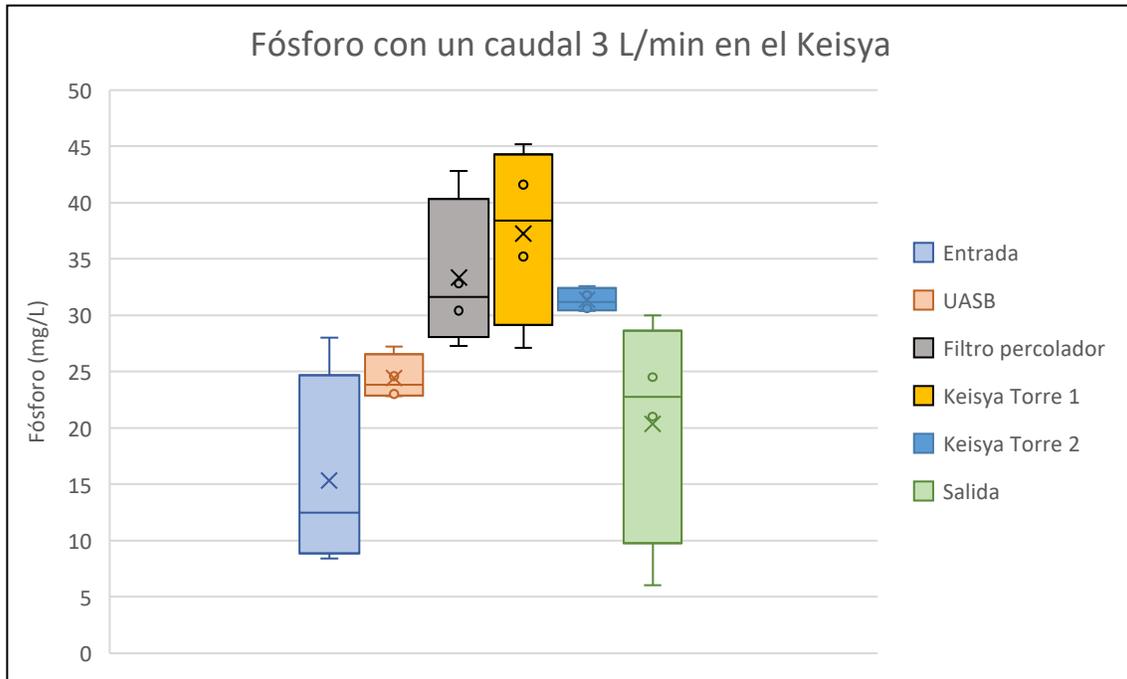


Figura 106. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

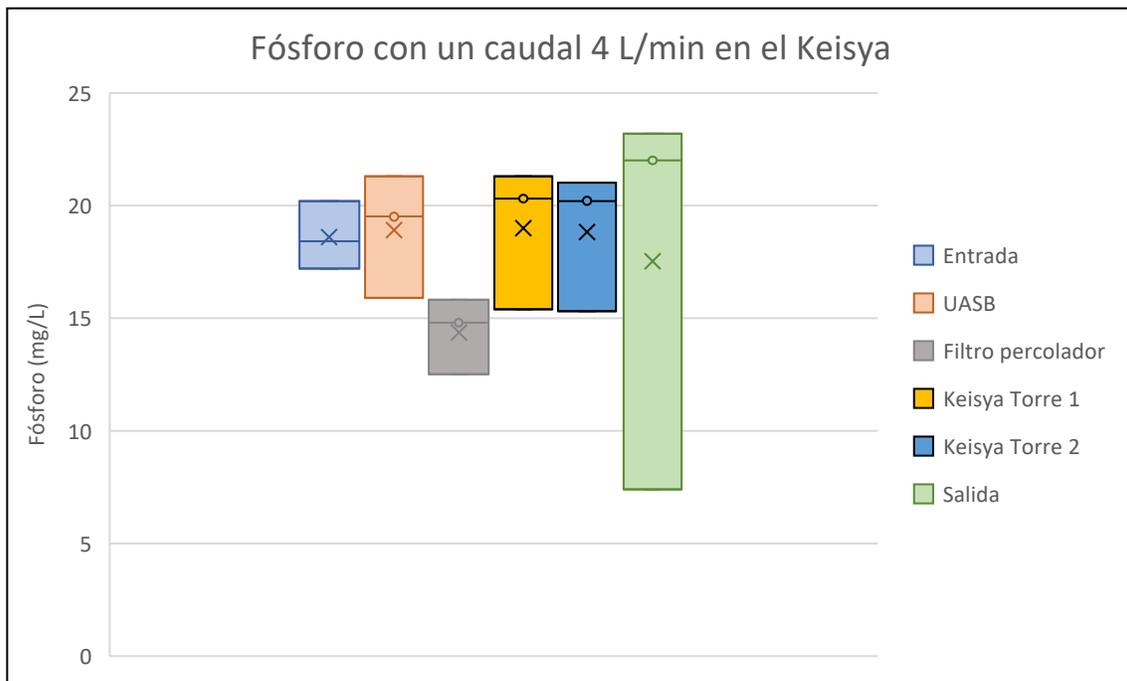


Figura 107. Gráfico de cajas y bigotes de fósforo para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

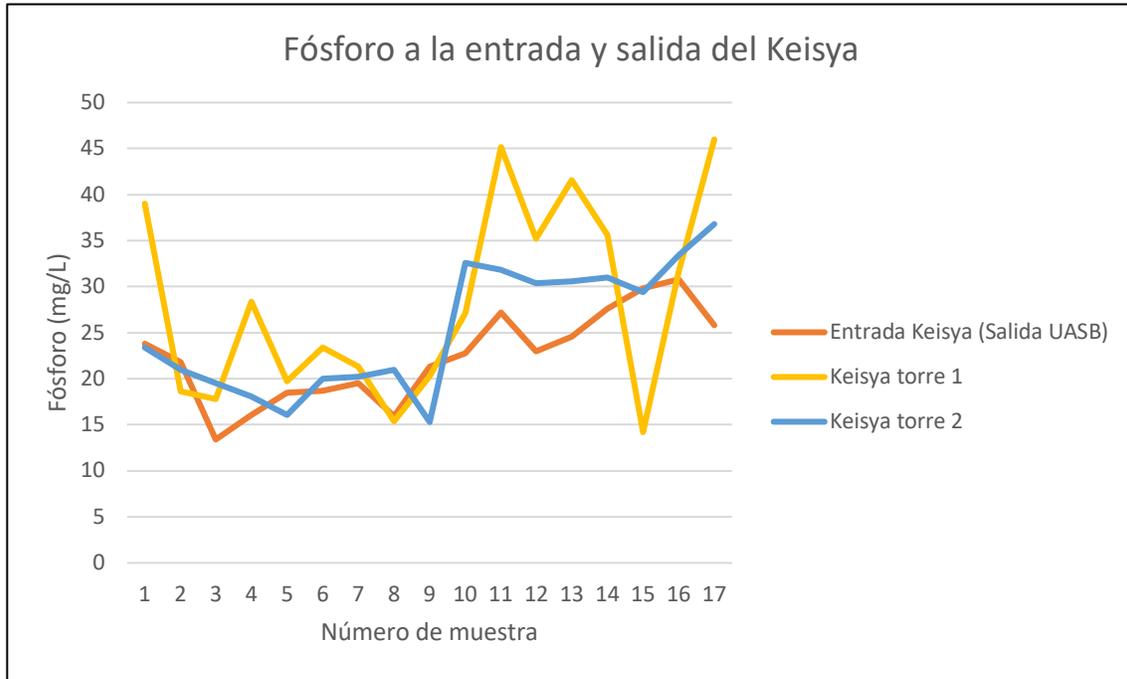


Figura 108. Gráfico de dispersión de fósforo a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 48. Resumen de valores obtenidos de fósforo en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	538,21	38,30	6,17	31,50	12,83	31,90	131,47	31,85	15,27	27,65	247,65	34,55	4
2 L/min	49,30	20,15	16,80	21,77	8,33	20,48	72,53	21,32	5,17	19,68	64,82	16,28	6
3 L/min	59,05	15,33	31,10	32,40	33,73	33,33	47,34	37,28	0,81	31,35	79,17	20,38	4
4 L/min	1,52	18,60	5,04	18,90	3,38	15,03	6,65	19,00	6,96	20,07	51,58	17,53	3

Los valores obtenidos de fósforo son superiores a los valores de vertido que deberían tener las aguas residuales domésticas según lo visto anteriormente en el documento (6 y 20 mg/L). El promedio de los resultados de fósforo es de 24,17 mg/L.

La variación de los datos no sigue una tendencia específica, ya que en algunos casos aumenta y disminuye dependiendo de las condiciones de los componentes de la PTAR.

7.3 Resultados de las pruebas de sólidos: totales, suspendidos totales y volátiles

7.3.1 Sólidos totales

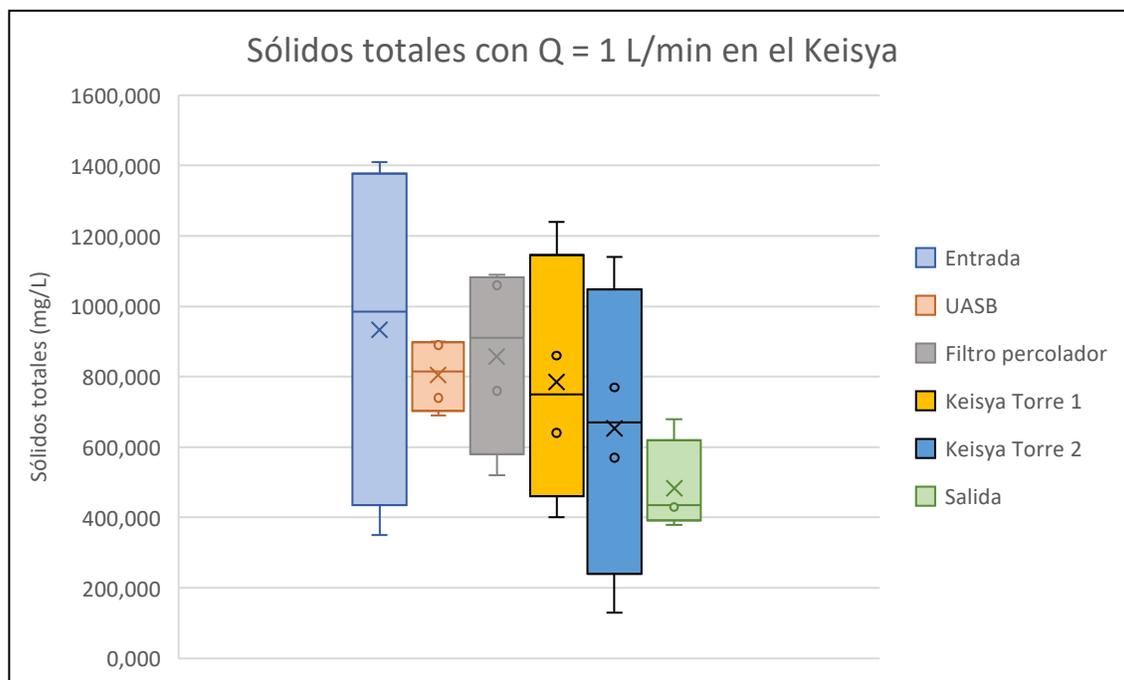


Figura 109. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1L/min

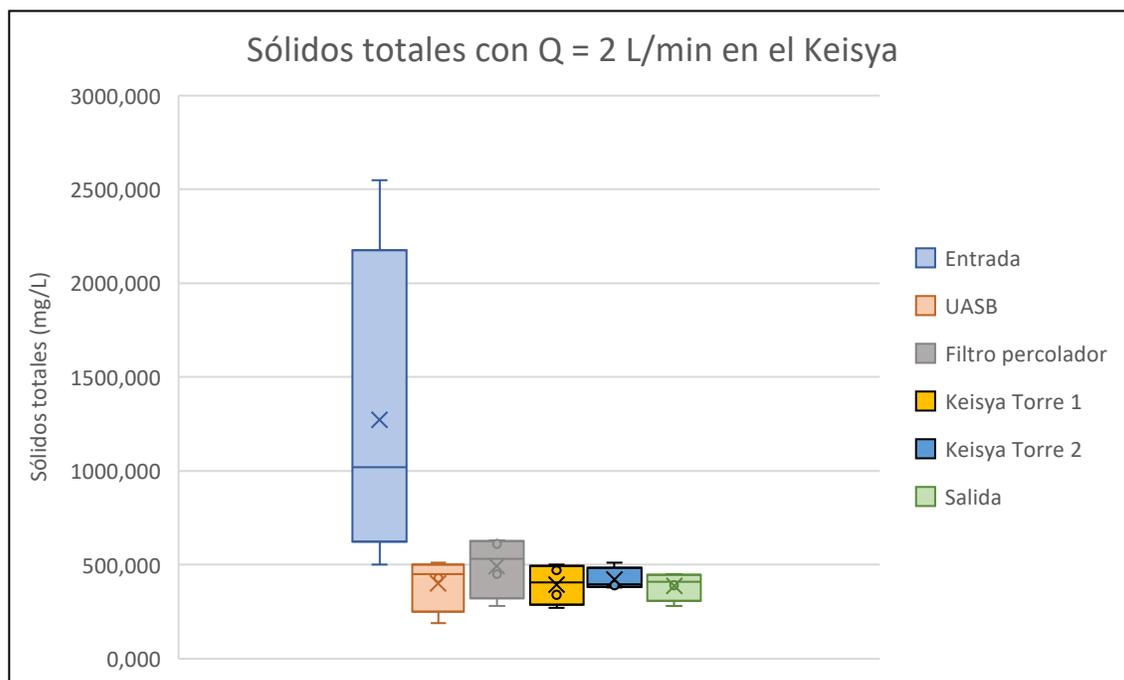


Figura 110. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2L/min

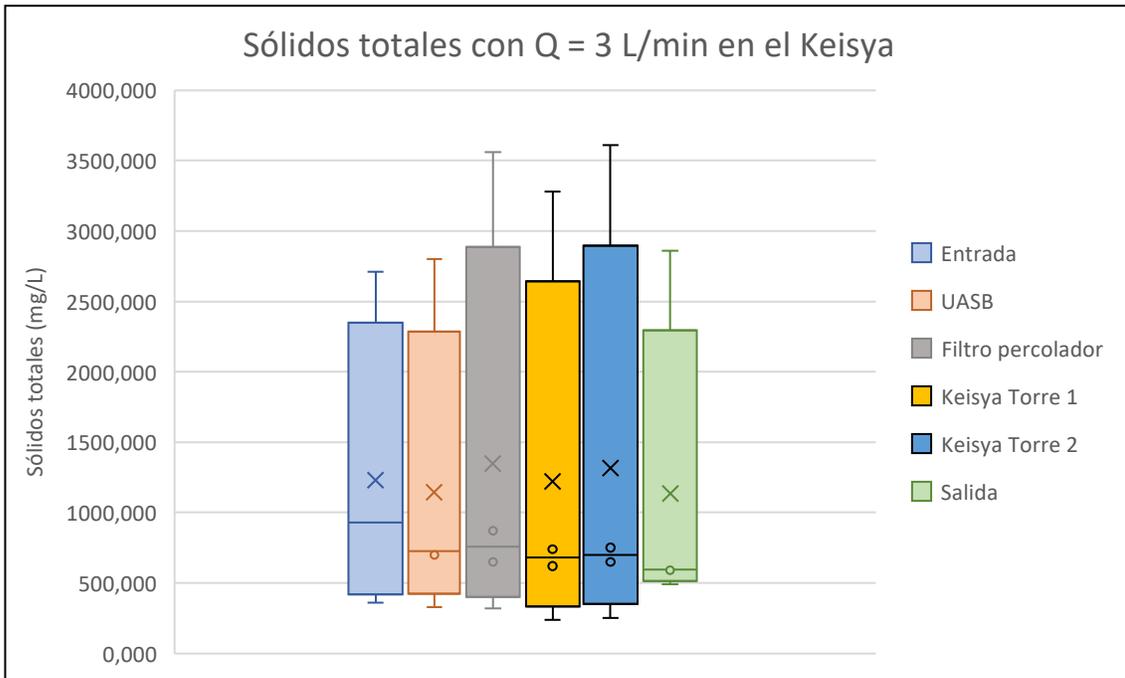


Figura 111. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

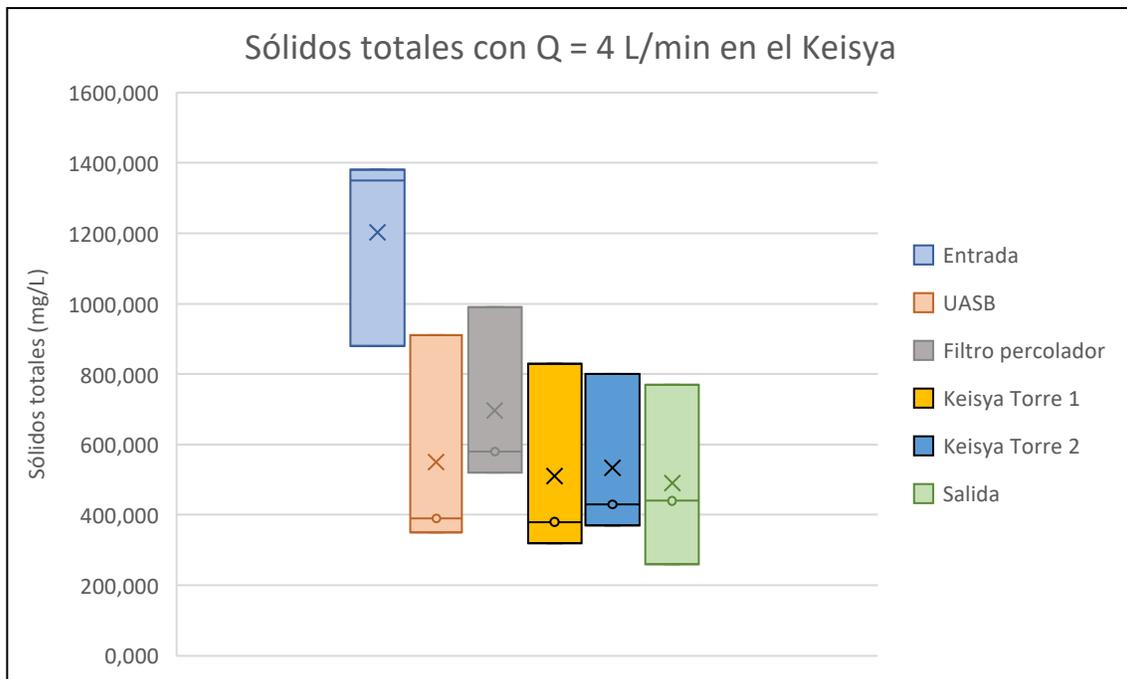


Figura 112. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4L/min

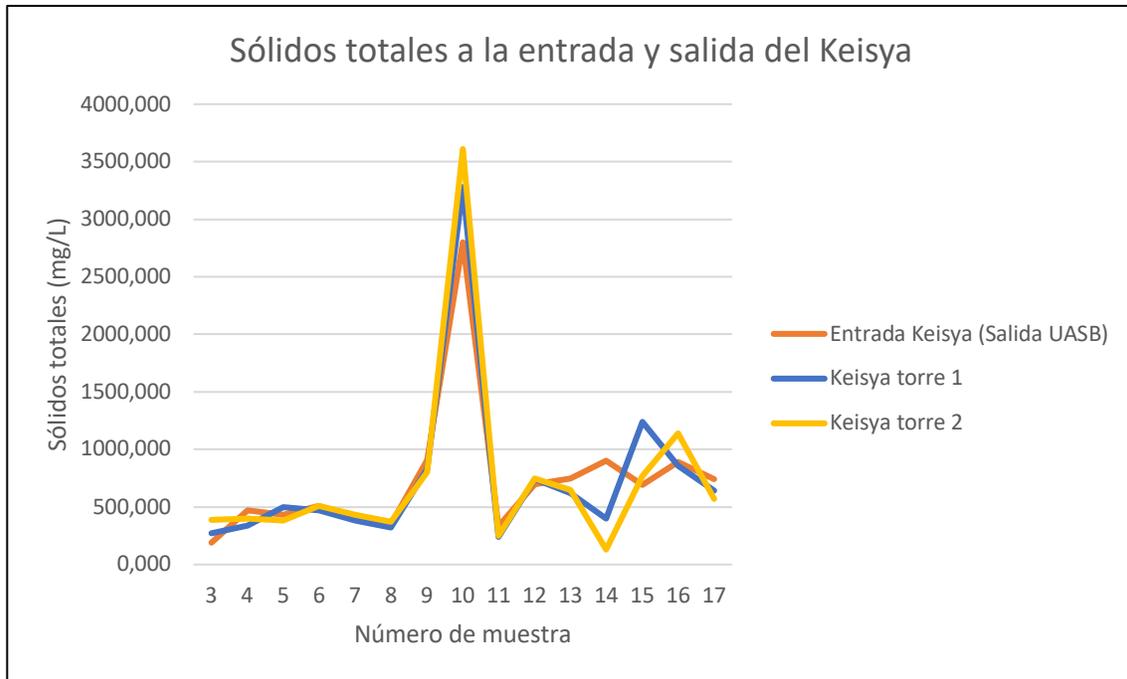


Figura 113. Gráfico de dispersión de sólidos totales a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 49. Resumen de valores obtenidos de sólidos totales en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	186718,75	932,50	8425,00	805,00	54618,75	857,50	95475,00	785,00	132818,75	652,50	13518,75	482,50	4
2 L/min	589518,75	1272,50	15500,00	400,00	19918,75	492,50	8825,00	395,00	2750,00	420,00	4318,75	387,50	4
3 L/min	836268,75	1232,50	939325,00	1145,00	1666350,00	1350,00	1448600,00	1220,00	1790675,00	1315,00	993725,00	1135,00	4
4 L/min	52422,22	1203,33	65066,67	550,00	43622,22	696,67	51800,00	510,00	36155,56	533,33	44600,00	490,00	3

Los resultados de sólidos totales se encuentran en un rango que va desde los 130 mg/L en la semana catorce hasta los 3610 mg/L en la semana diez, con un promedio de 812 mg/L en los valores de sólidos totales medidos en los componentes de la PTAR y el Keisya.

El muestreo diez tiene un pico de los sólidos totales desde la entrada hasta el vertido de la PTAR, lo cual puede deberse a factores externos donde a la planta ingresaron aguas residuales con altos contenidos de sólidos que no pudieron ser removidos por el tratamiento primario ni el secundario. A pesar de que este muestreo fue realizado

después de la falla del Keisya con el caudal de 4 L/min no se encuentra relación con estos altos valores de sólidos totales.

El promedio de sólidos totales sigue la tendencia de disminuir conforma avanza el tratamiento de las aguas residuales en la PTAR y la planta piloto tipo Keisya, llegando a los menores valores correspondientes al vertido.

7.3.2 Sólidos suspendidos totales

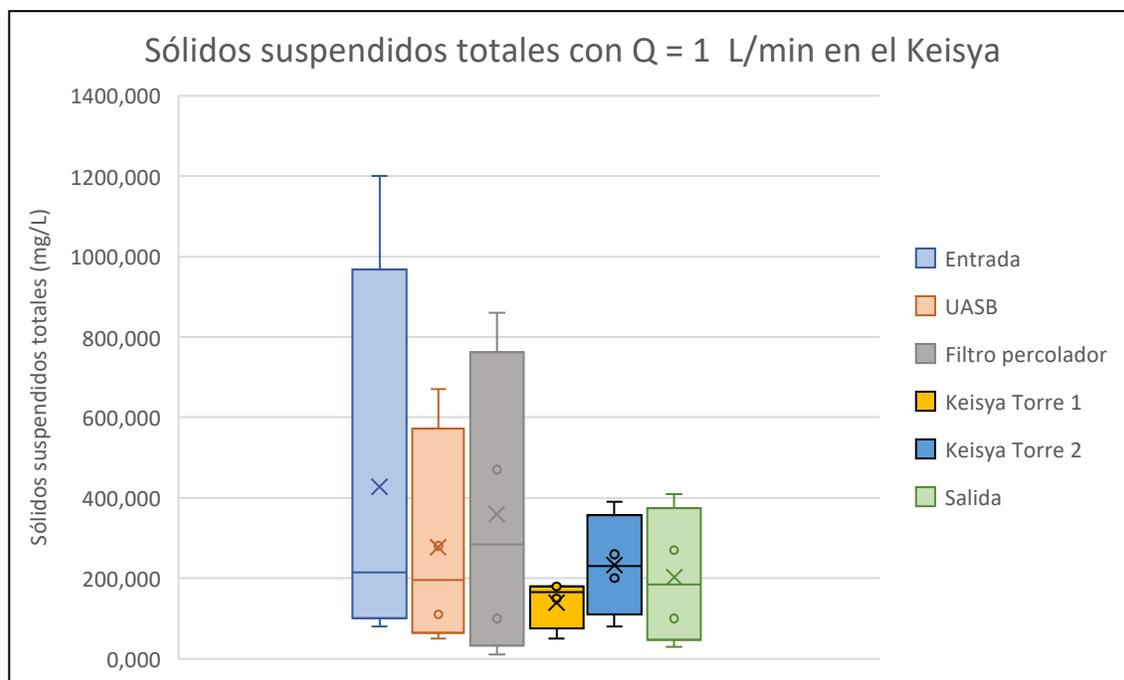


Figura 114. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

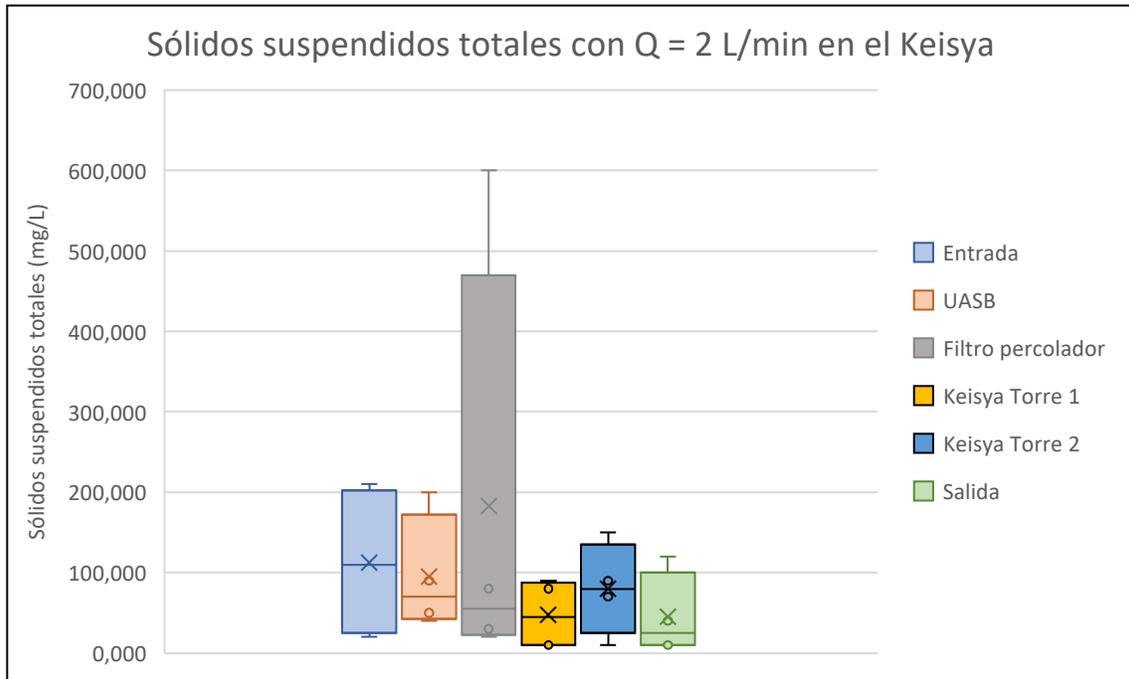


Figura 115. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

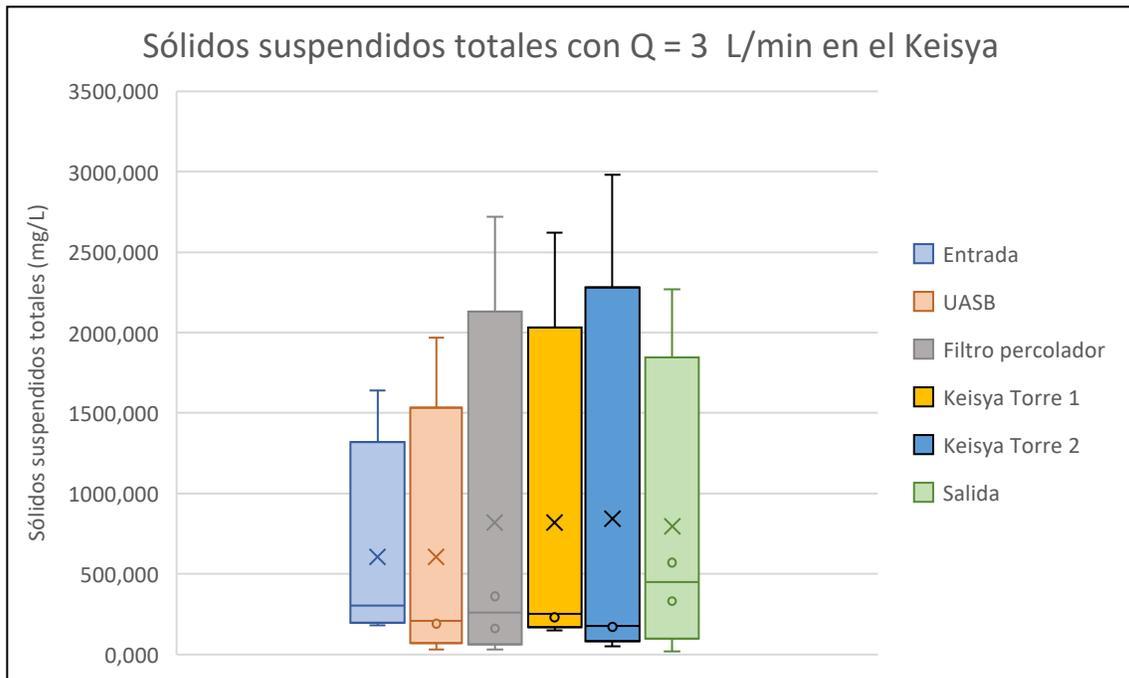


Figura 116. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

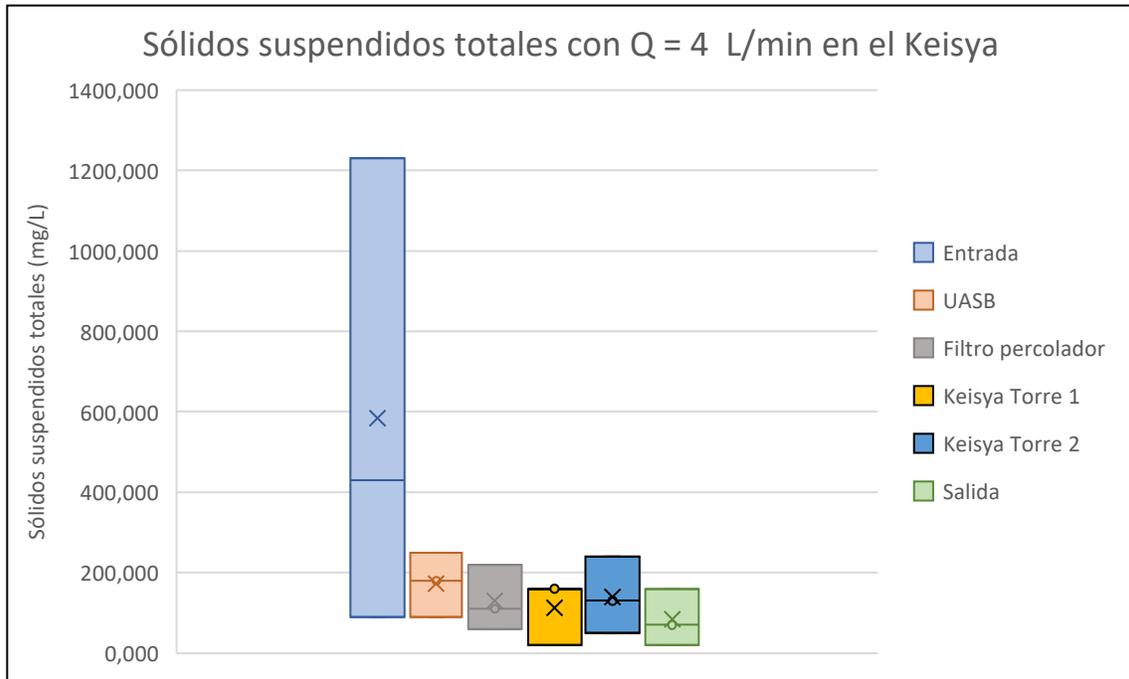


Figura 117. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos suspendidos totales para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

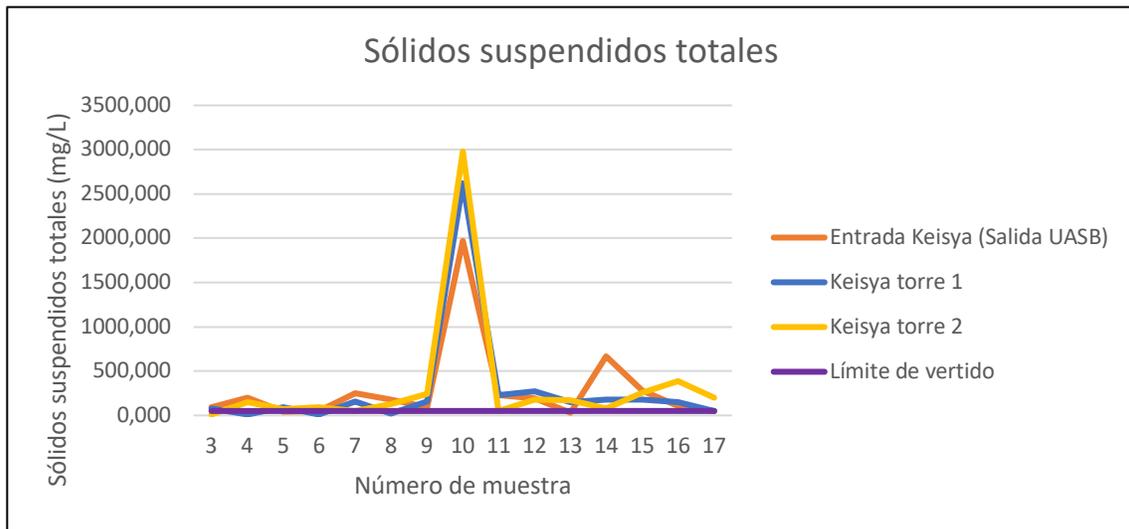


Figura 118. Gráfico de dispersión de sólidos suspendidos totales a la entrada y salida del Keisya



Figura 119. Gráfico de dispersión de los sólidos suspendidos totales a la salida de la PTAR

Cuadro 50. Resumen de valores obtenidos de sólidos suspendidos totales en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	203468,75	427,50	58468,75	277,50	113050,00	360,00	2850,00	140,00	12468,75	232,50	21968,75	202,50	4
2 L/min	6968,75	112,50	4025,00	95,00	58618,75	182,50	1418,75	47,50	2500,00	80,00	2025,00	45,00	4
3 L/min	359468,75	607,50	626675,00	605,00	1220318,75	817,50	1084868,75	817,50	1522025,00	845,00	760768,75	797,50	4
4 L/min	228355,56	583,33	4288,89	173,33	4466,67	130,00	4355,56	113,33	6066,67	140,00	3355,56	83,33	3

Al igual que en los sólidos totales, se presenta un valor elevado de SST en el décimo muestreo realizado donde los valores llegan a alcanzar los 2980 mg/L en la salida de la torre 2 del Keisya y muy similares en los demás sistemas de tratamiento. Por lo tanto, como fue explicado anteriormente se indica como motivo principal la influencia de factores externos que provocaron la entrada de gran cantidad de sólidos a la PTAR.

La tendencia de los SST al pasar por los componentes de la PTAR y el Keisya es de disminuir, lo cual se puede observar principalmente en los valores de entrada y de salida de la PTAR. También se puede observar en la mayoría de muestreos que el filtro percolador aumenta la cantidad de SST provenientes del UASB, lo que indica

que esta unidad de tratamiento está aportando SST a las aguas residuales que deben ser removidas luego por el sedimentador secundario y el filtro de carbón activado.

7.3.3 Sólidos volátiles

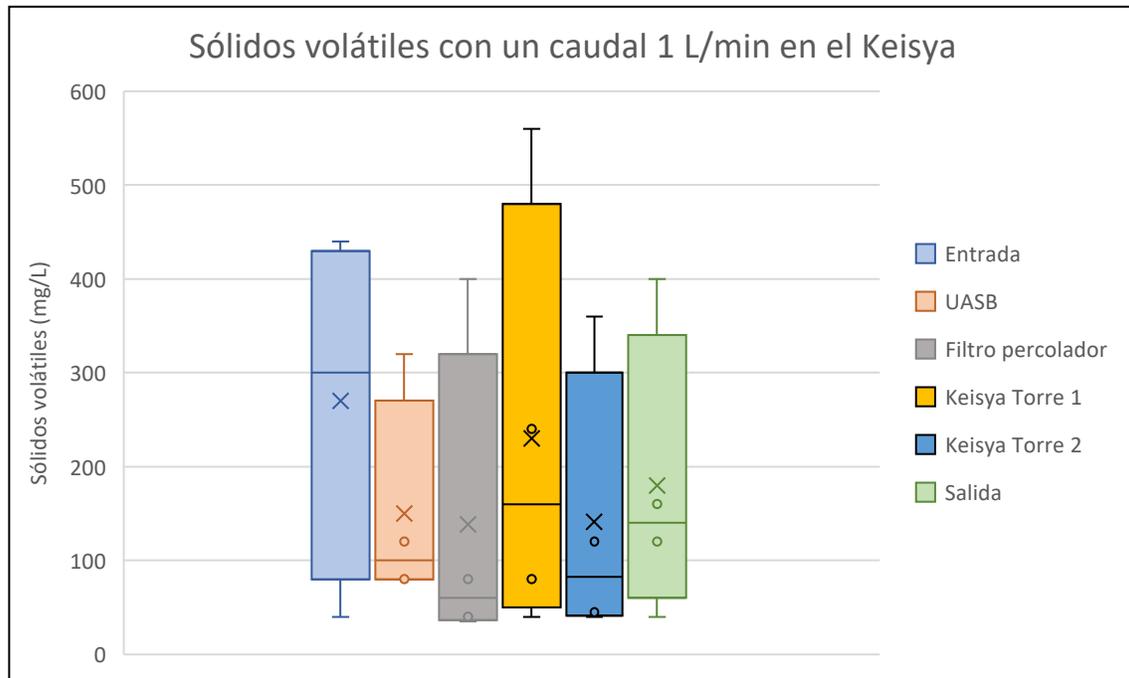


Figura 120. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

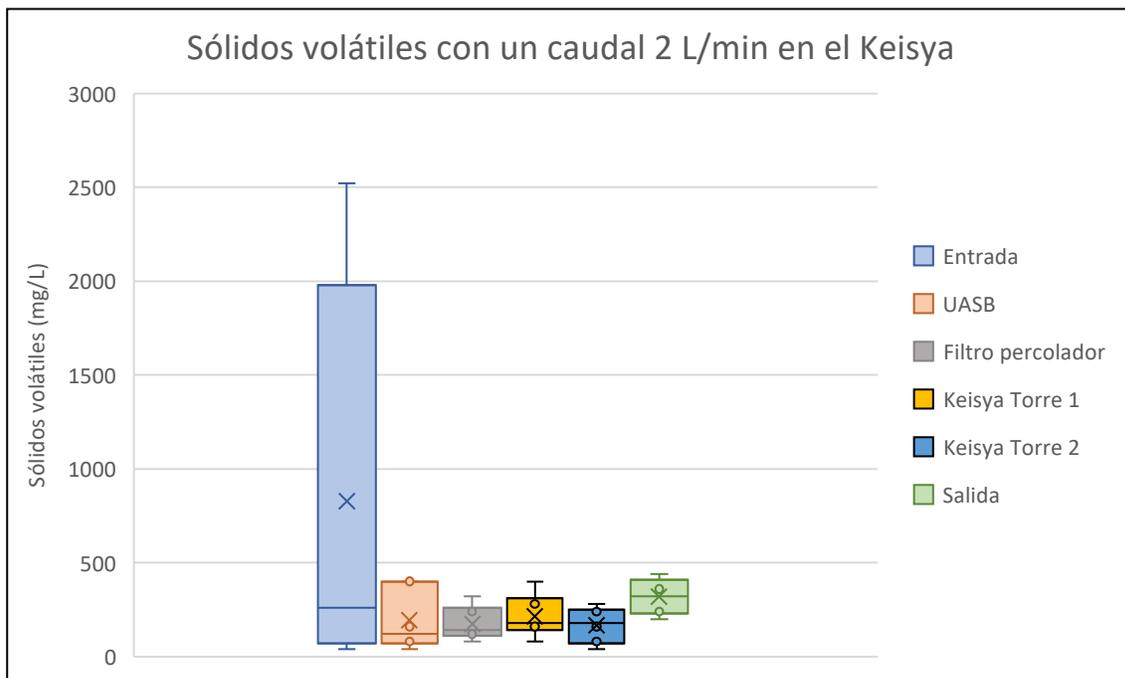


Figura 121. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

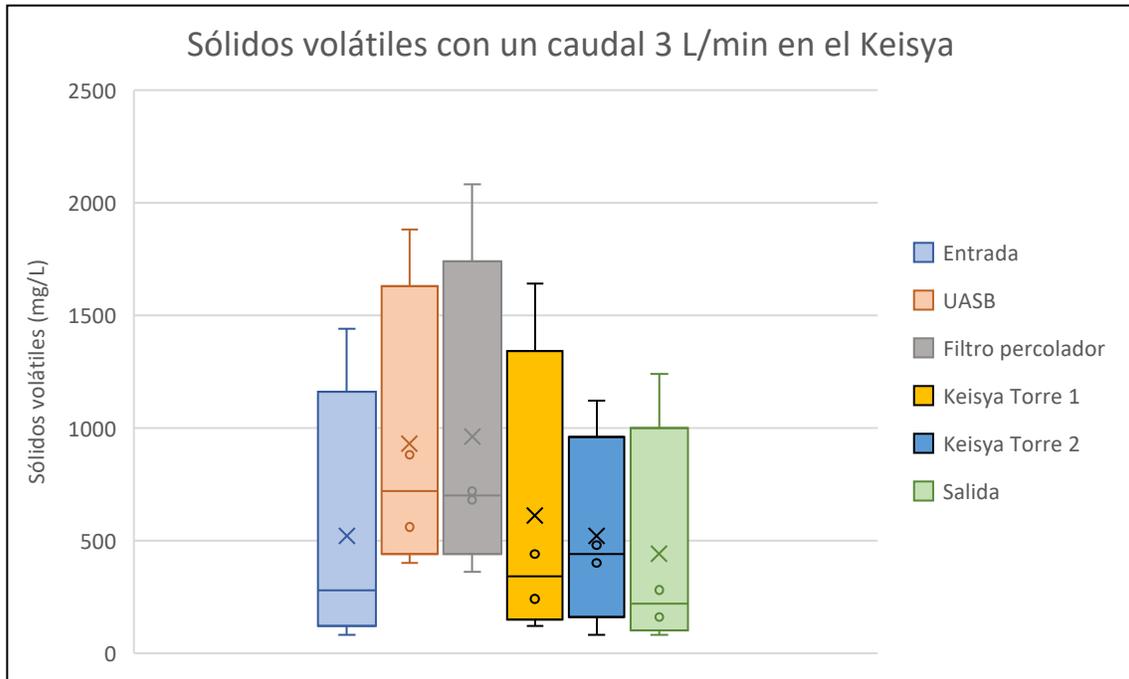


Figura 122. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

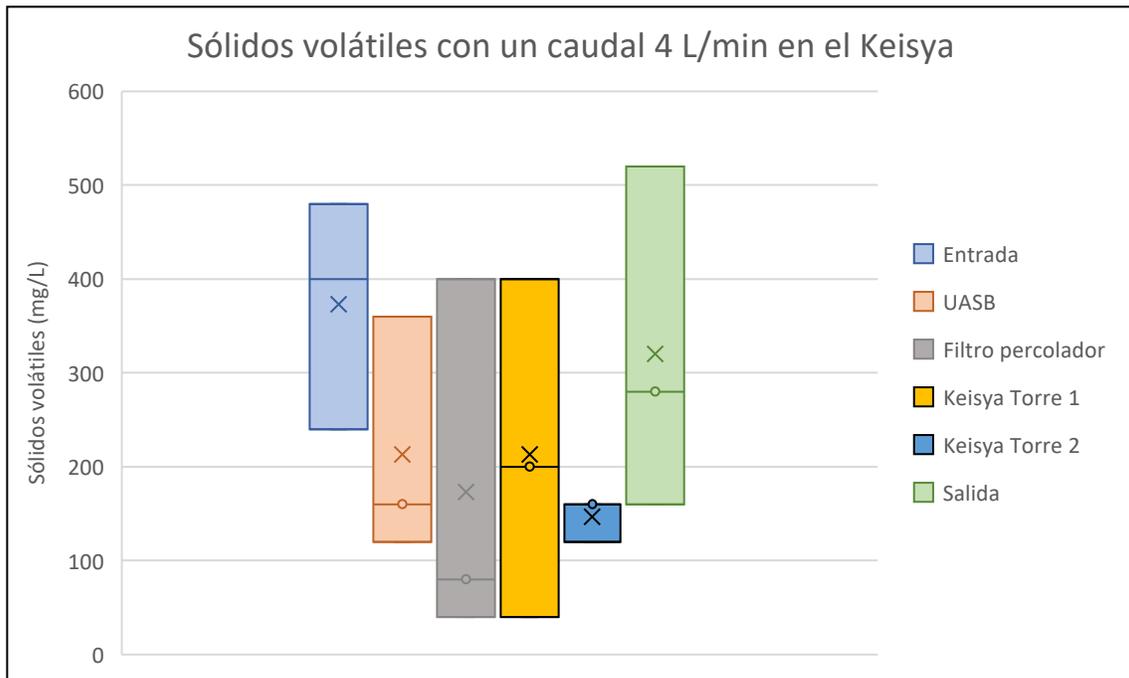


Figura 123. Gráfico de cajas y bigotes de sólidos volátiles para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

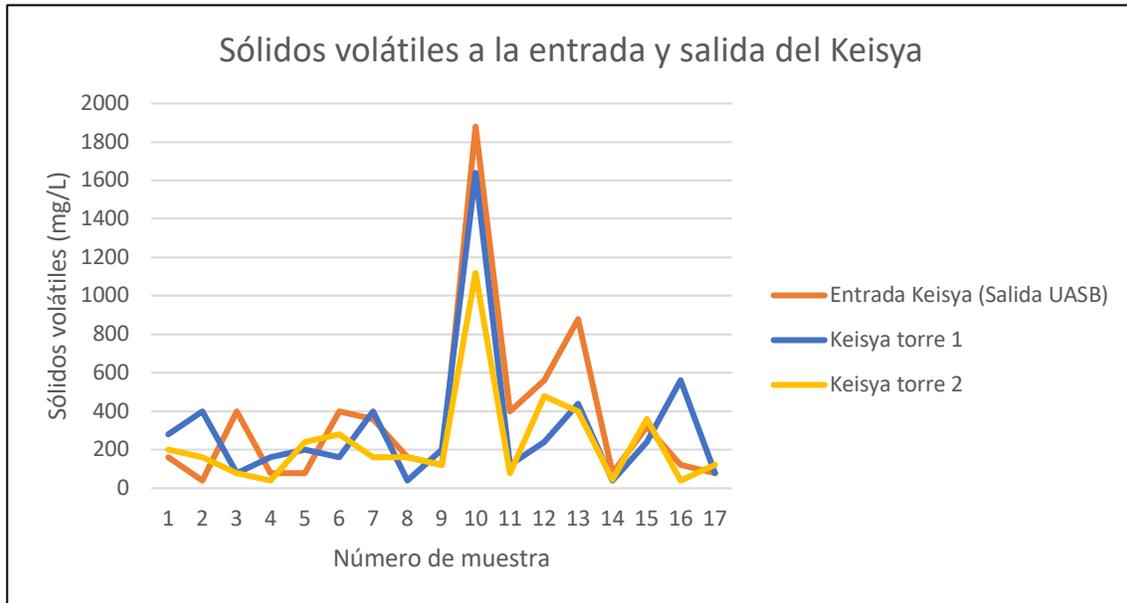


Figura 124. Gráfico de dispersión de sólidos volátiles en los puntos de muestreo

Cuadro 51. Resumen de valores obtenidos de sólidos volátiles en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 Lmin	25900,00	270,00	9900,00	150,00	547504,69	478,75	506000,00	620,00	276279,69	371,25	195500,00	510,00	6
2 L/min	945422,22	826,67	596622,22	493,33	6755,56	173,33	10488,89	213,33	7155,56	166,67	7466,67	320,00	4
3 L/min	41600,00	320,00	743200,00	1200,00	437600,00	960,00	18700,00	310,00	37100,00	250,00	8400,00	140,00	4
4 L/min	9955,56	373,33	11022,22	213,33	25955,56	173,33	21688,89	213,33	355,56	146,67	22400,00	320,00	3

Los sólidos volátiles muestreados tienen un promedio de 353,3 mg/L y una mediana de 220 mg/L después de realizadas las pruebas de laboratorio. Se puede observar que a la entrada de la PTAR ingresan gran cantidad de sólidos volátiles que conforme continúan con el proceso de tratamiento se logra la remoción de estos.

En el cuadro anterior se puede apreciar que los datos tienen varianzas altas, lo que ejemplifica la variabilidad de los datos con respecto a su media.

7.4 Resultados de las pruebas de DQO y DBO

7.4.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

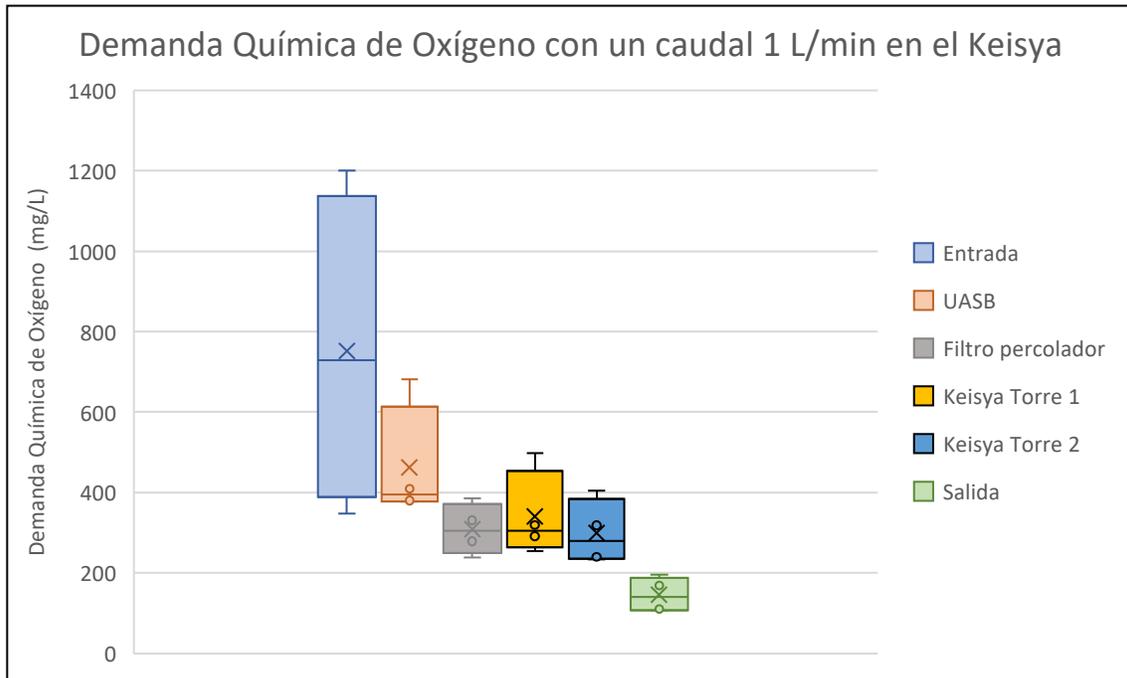


Figura 125. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

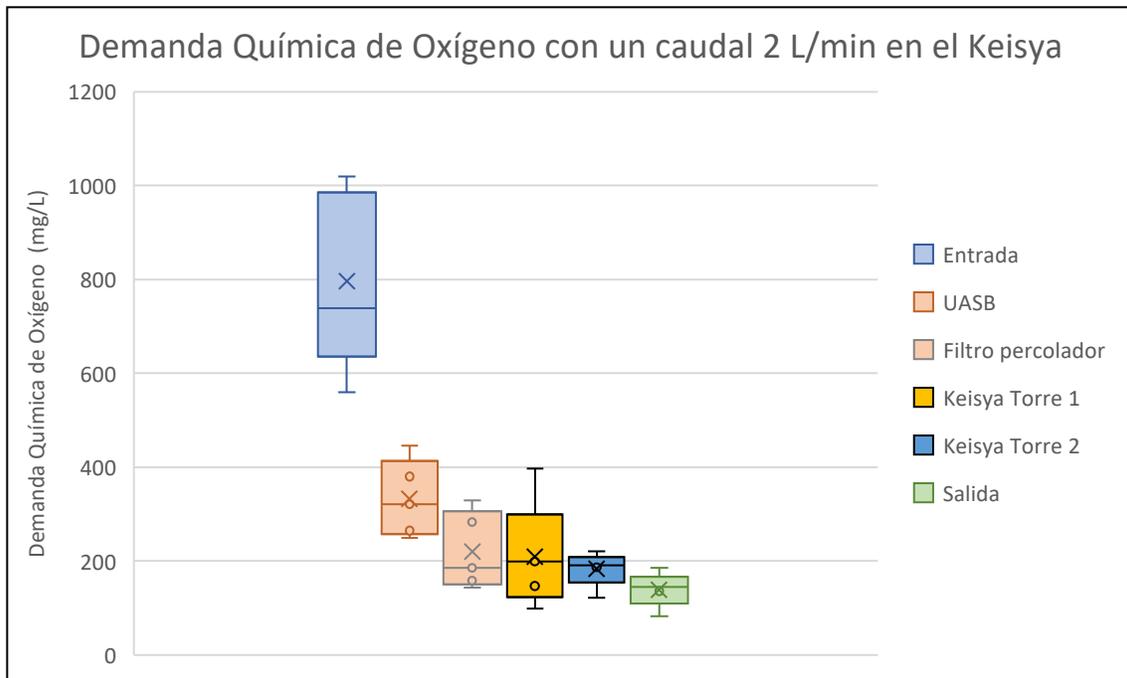


Figura 126. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

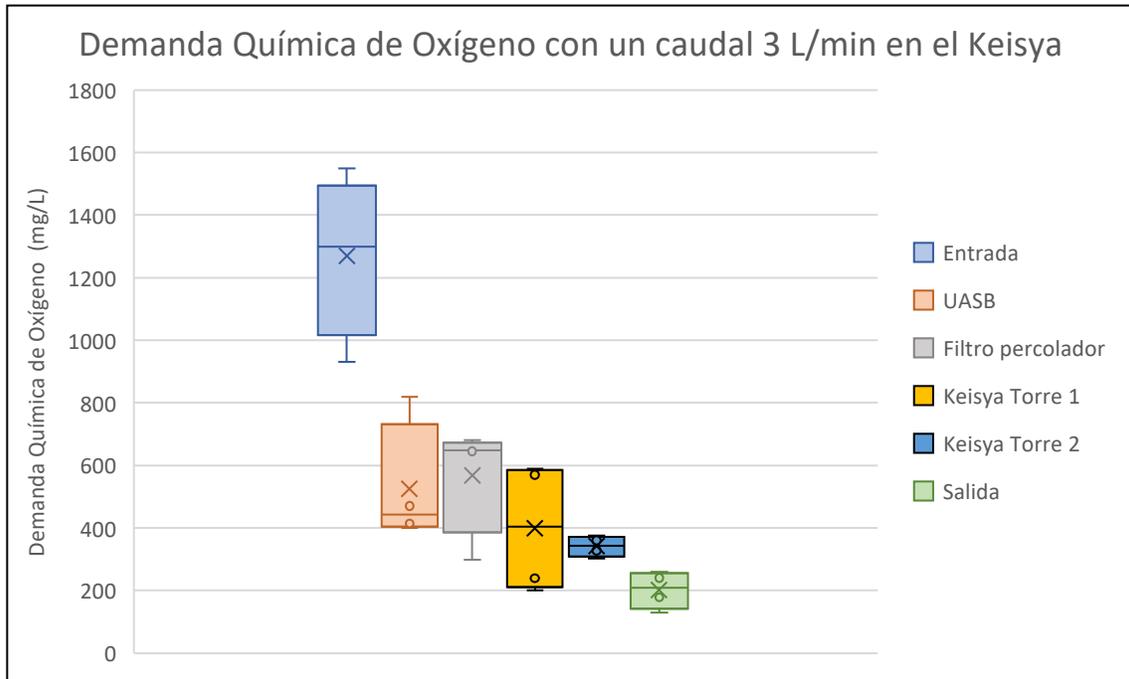


Figura 127. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

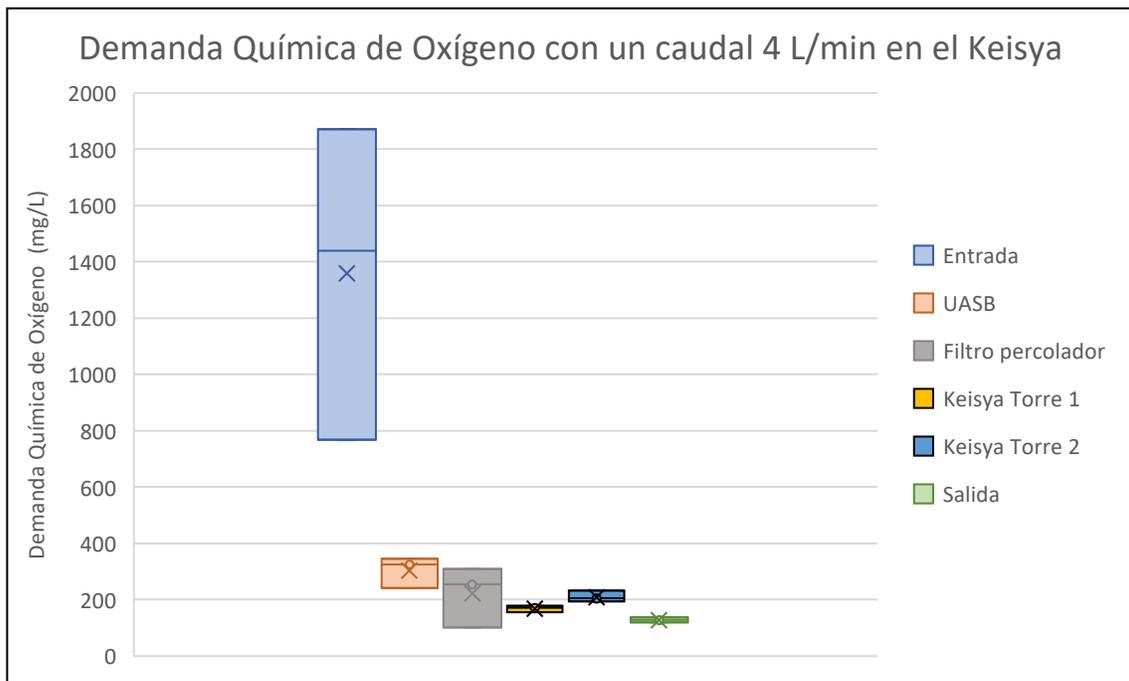


Figura 128. Gráfico de cajas y bigotes de DQO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

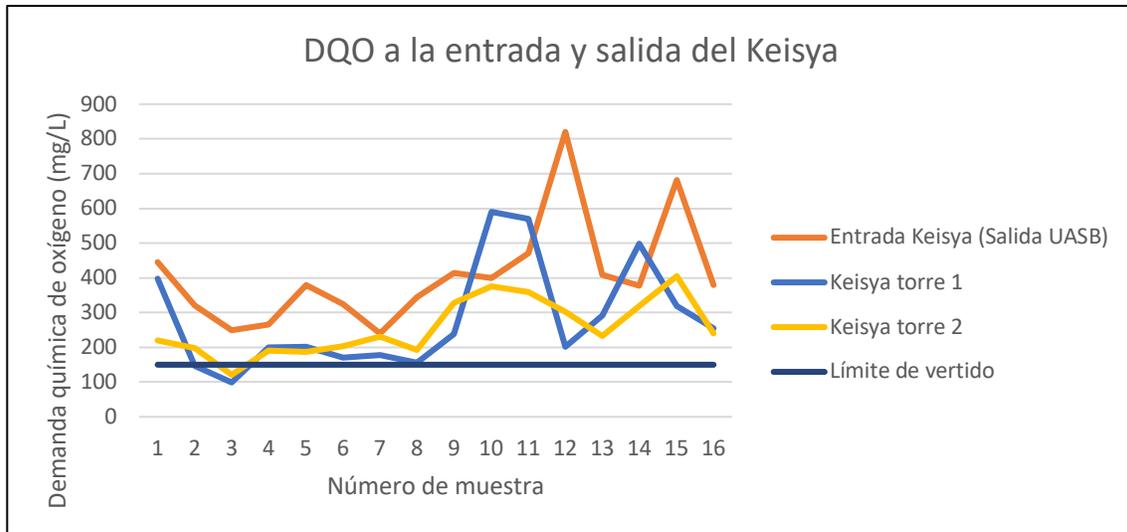


Figura 129. Gráfico de dispersión de DQO a la entrada y salida del Keisya

Cuadro 52. Resumen de valores obtenidos de DQO en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	114886,19	751,75	16179,69	461,75	3014,75	308,50	8800,25	340,50	4858,50	299,00	1436,19	145,25	5
2 L/min	28109,44	796,40	5359,76	332,20	5369,44	219,60	10287,36	208,80	1103,44	183,40	1098,16	139,20	4
3 L/min	49230,19	1270,25	29498,00	526,00	24389,25	568,50	32630,50	400,00	799,19	341,75	2642,00	202,00	4
4 L/min	206048,67	1359,00	2044,67	303,00	7664,22	221,67	92,67	168,00	254,89	209,33	60,67	128,00	3

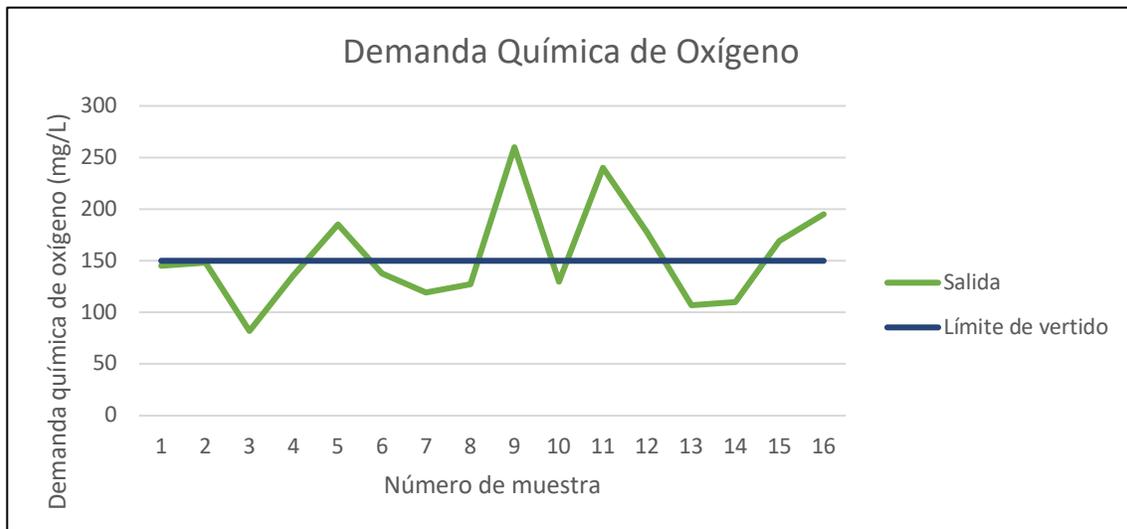


Figura 130. Gráfico de dispersion de DQO a la salida de la PTAR

Tomando en cuenta todos los muestreos, la PTAR tiene una DQO con promedio de 406,52 mg/L con un valor máximo de 1870 mg/L a la entrada de la PTAR y un valor mínimo de 82 mg/L a la salida de la PTAR.

Conforme se tratan las aguas residuales en la PTAR y la planta piloto, la tendencia de los valores de DQO es de disminuir, por lo que se puede observar que se tienen valores elevados a la entrada y valores de menor magnitud a la salida de la PTAR.

7.4.2 Demanda bioquímica de oxígeno

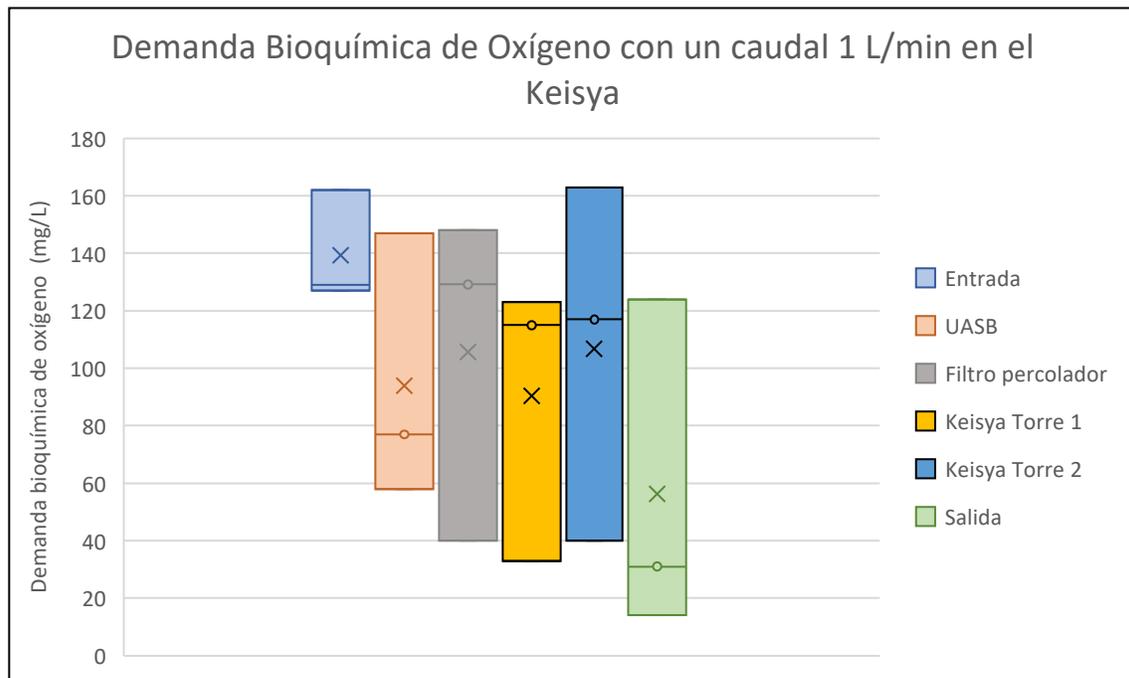


Figura 131. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

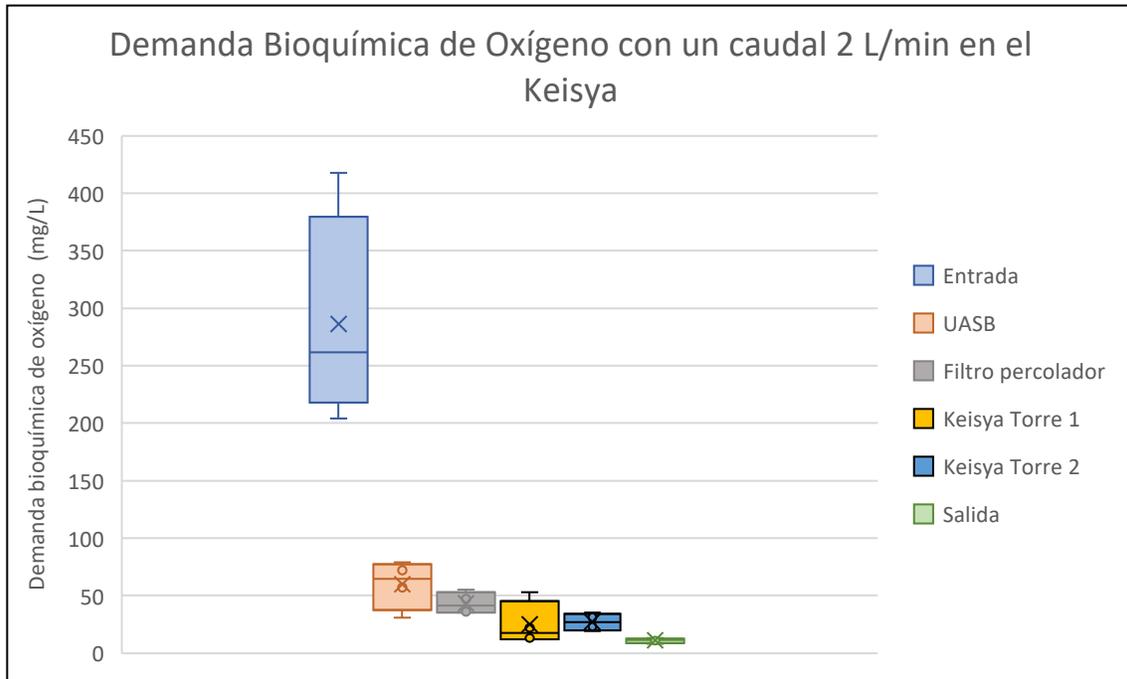


Figura 132. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

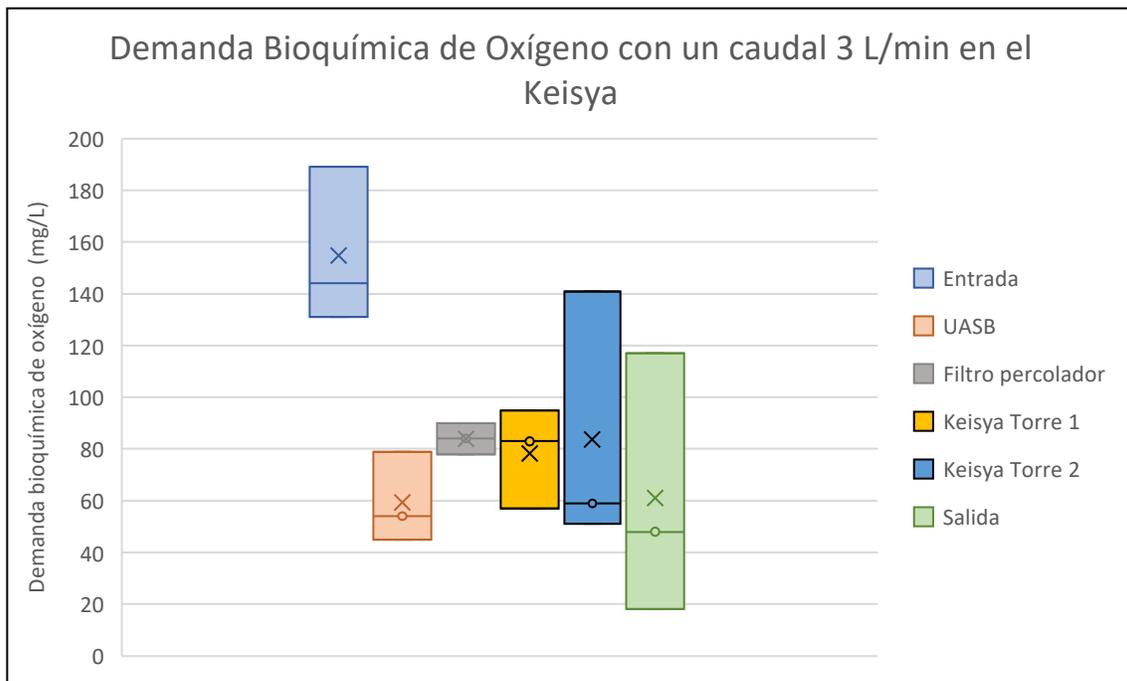


Figura 133. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min

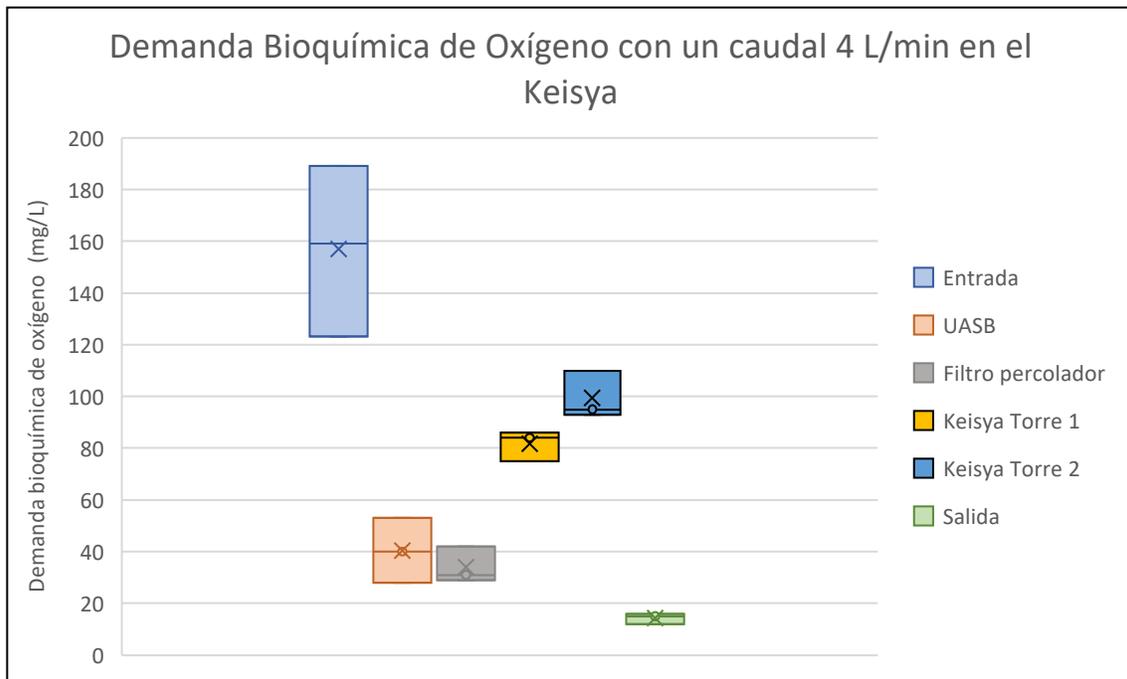


Figura 134. Gráfico de cajas y bigotes de DBO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

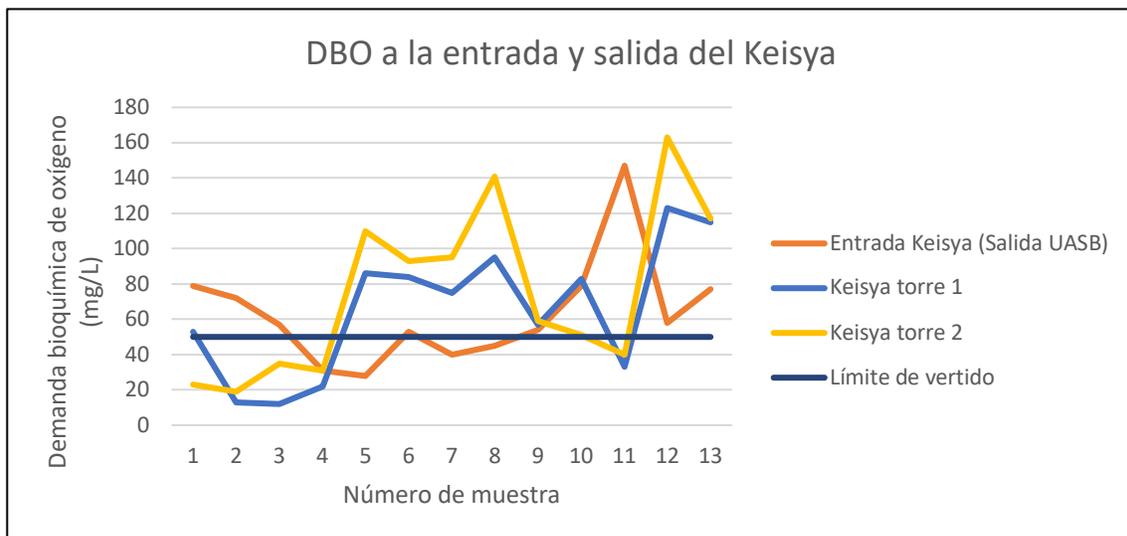


Figura 135. Gráfico de dispersión de DBO a la entrada y salida del Keisya

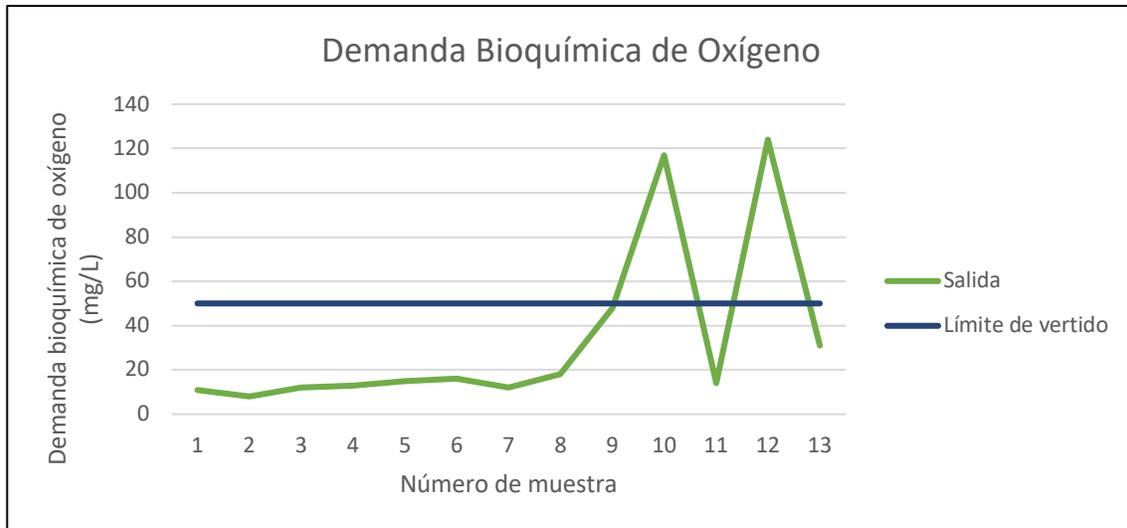


Figura 136. Gráfico de dispersión de DBO a la salida de la PTAR

Cuadro 53. Resumen de valores obtenidos de DBO en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR (mg/L)		Salida UASB (mg/L)		Salida Filtro percolador (mg/L)		Salida Keisya Izquierdo (mg/L)		Salida Keisya Derecho (mg/L)		Salida PTAR (mg/L)		Cantidad de muestreos
	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	Varianza	Prom	
1 L/min	257,56	139,33	1464,67	94,00	2218,26	105,71	1654,22	90,33	2574,89	106,67	2337,56	56,33	3
2 L/min	6332,83	286,39	338,69	59,75	68,19	43,25	276,50	25,00	40,00	27,00	3,50	11,00	4
3 L/min	617,56	154,67	206,89	59,33	24,00	84,00	251,56	78,33	1654,22	83,67	1718,00	61,00	3
4 L/min	725,81	157,03	105,23	40,29	32,67	34,00	22,89	81,67	57,56	99,33	2,89	14,33	3

La entrada a la PTAR presenta los valores más elevados de DBO, mientras que la salida de la PTAR presenta los valores mínimos. Los resultados de DBO tienen la tendencia a disminuir desde la entrada hasta la salida de la PTAR. Se observa además, que el sedimentador secundario y el filtro de carbón activado cumplen un papel importante en la remoción de DBO, ya que las aguas residuales provenientes del filtro percolador y del Keisya disminuyen su concentración considerablemente después de que son tratadas en estas unidades.

7.4.3 Relación DBO/DQO

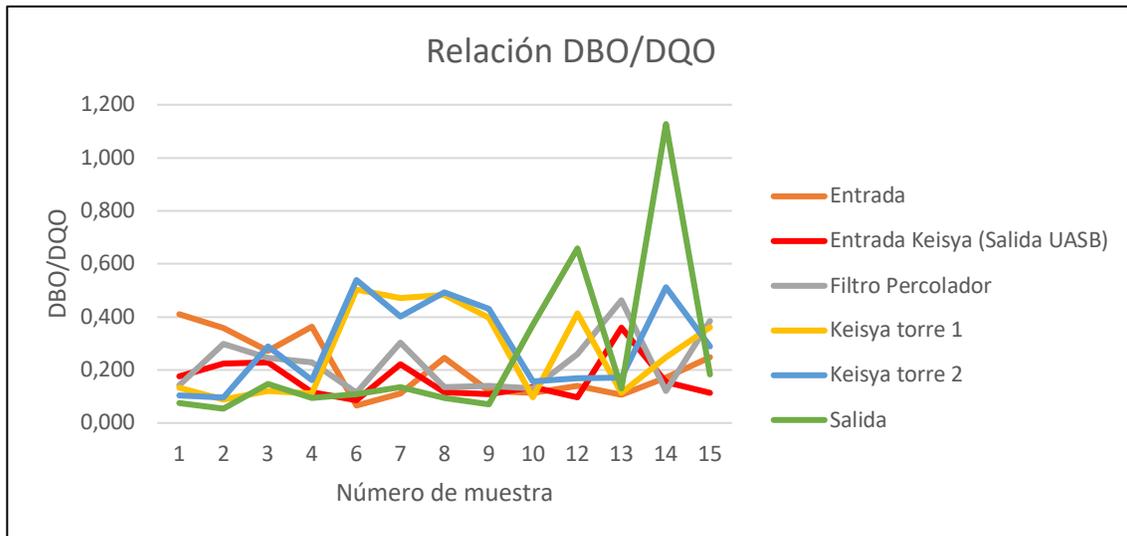


Figura 137. Gráfico de dispersión de la relación DBO/DQO en todos los puntos de muestreo



Figura 138. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 1 L/min

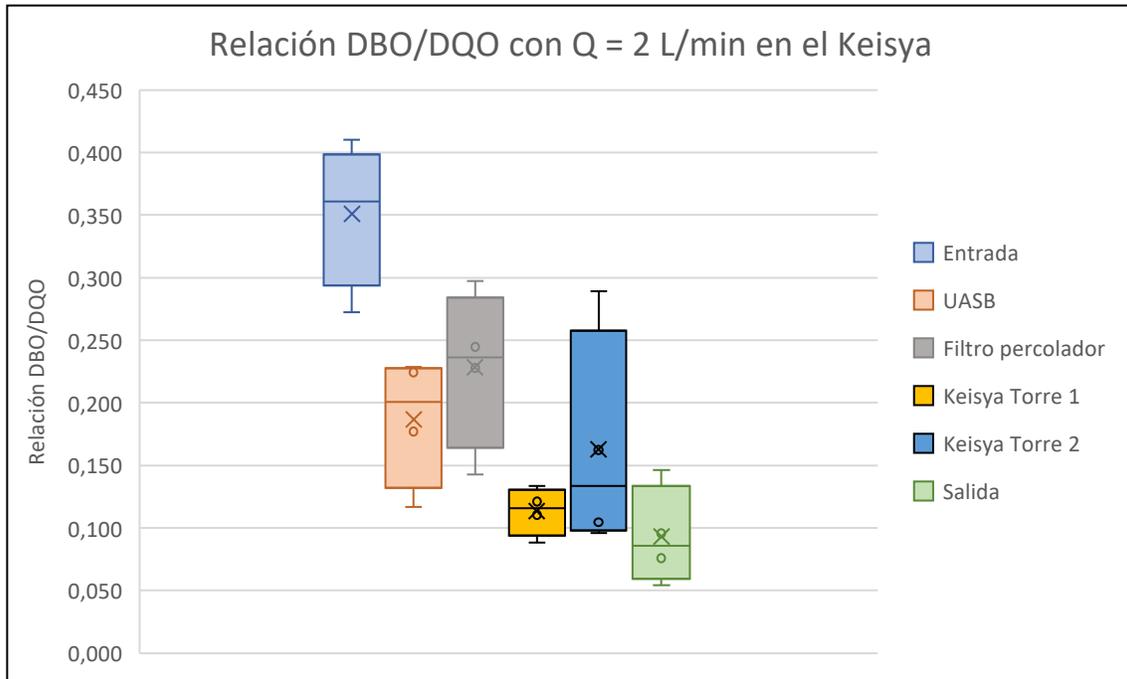


Figura 139. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 2 L/min

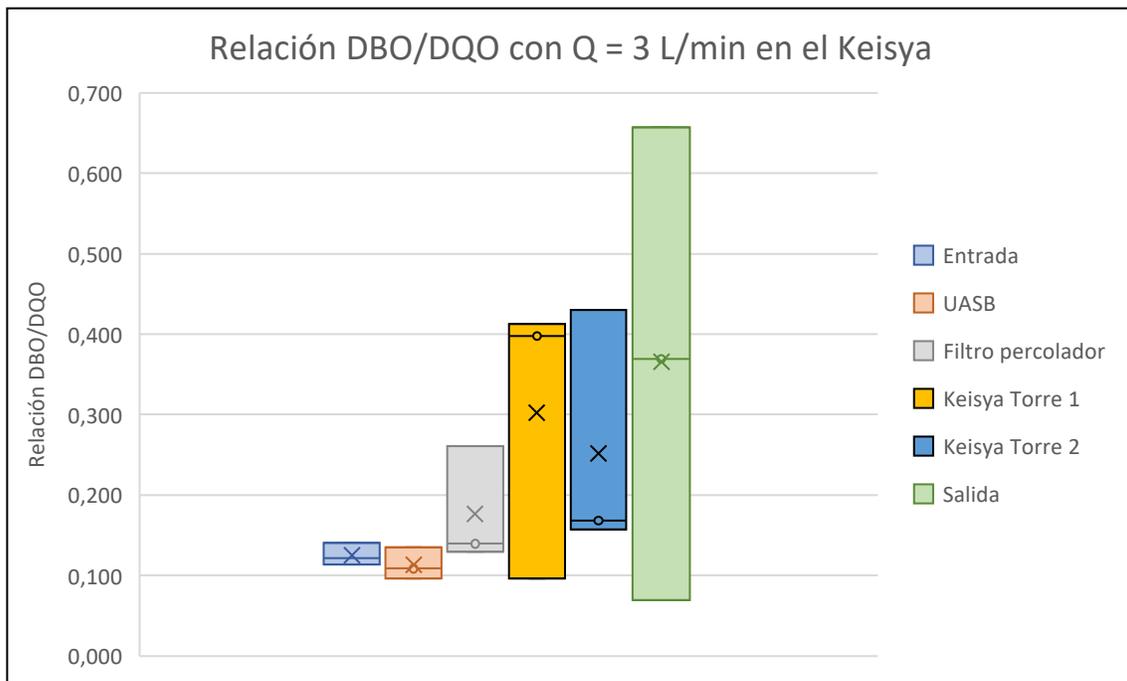


Figura 140. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min



Figura 141. Gráfico de cajas y bigotes de DBO/DQO para un caudal de entrada al Keisya de 4 L/min

Cuadro 54. Resumen de valores obtenidos de la relación DBO/DQO en los muestreos

Caudal en el Keisya	Entrada PTAR		Salida UASB		Salida Filtro percolador		Salida Keisya Izquierdo		Salida Keisya Derecho		Salida PTAR		Cantidad de muestreos
	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	Var	Prom	
1 L/min	0,00	0,18	0,01	0,21	0,02	0,32	0,01	0,24	0,02	0,32	0,21	0,48	3
2 L/min	0,00	0,35	0,00	0,19	0,00	0,23	0,00	0,11	0,01	0,16	0,00	0,09	4
3 L/min	0,00	0,13	0,00	0,11	0,00	0,18	0,02	0,30	0,02	0,25	0,06	0,37	3
4 L/min	0,01	0,14	0,00	0,14	0,01	0,18	0,00	0,49	0,00	0,48	0,00	0,11	3

Los valores de la relación DBO/DQO no siguen una tendencia específica de disminución o aumento conforme las aguas son tratadas por la PTAR y la planta piloto. Lo que se puede apreciar es que la varianza de los datos en las distintas unidades de tratamiento son 0 o valores muy cercanos a 0.

7.5 Resultados de las pruebas de eficiencia del filtro biológico tipo Keisya

En esta sección se presentan las eficiencias experimentales del filtro biológico tipo Keisya calculadas con los datos obtenidos durante los muestreos realizados. Estas eficiencias son analizadas en la sección *8.6 Análisis de la eficiencia experimental del filtro biológico tipo Keisya*.

Las eficiencias se determinan para los cuatro caudales de estudio, utilizando el promedio, valor máximo y valor mínimo de DBO y sólidos suspendidos totales. Además las eficiencias experimentales del Keisya se calcularon para cada torre por separado, y uniendo los datos de ambas torres para observar el comportamiento del sistema en total.

Cuadro 55. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de DBO

Eficiencia experimental del Keisya de DBO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	94,0	90,3	106,7	98,5	4,6	-12,7	-4,0
2,0	72,0	25,0	27,0	26,0	65,3	62,5	63,9
3,0	59,3	78,3	83,7	81,0	-32,0	-41,0	-36,5
4,0	40,3	81,7	99,3	90,5	-102,7	-146,5	-124,6

Cuadro 56. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de DBO

Eficiencia experimental del Keisya con máximos de DBO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	147,0	123,0	163,0	163,0	16,3	-10,9	-10,9
2,0	79,0	53,0	53,0	53,0	32,9	32,9	32,9
3,0	79,0	95,0	141,0	141,0	-20,3	-78,5	-78,5
4,0	53,0	86,0	110,0	110,0	-62,3	-107,5	-107,5

Cuadro 57. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de DBO

Eficiencia experimental del Keisya con mínimos de DBO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	58,0	33,0	40,0	33,0	43,1	31,0	43,1
2,0	31,0	12,0	19,0	12,0	61,3	38,7	61,3
3,0	45,0	57,0	51,0	51,0	-26,7	-13,3	-13,3
4,0	27,9	75,0	93,0	75,0	-169,0	-233,6	-169,0

Cuadro 58. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de SST

Eficiencias experimental del Keisya con promedio de SST							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	277,5	140,0	232,5	186,2	49,5	16,2	32,9
2,0	95,0	47,5	80,0	63,8	50,0	15,8	32,9
3,0	605,0	817,5	845,0	831,2	-35,1	-39,7	-37,4
4,0	173,3	113,3	140,0	126,7	34,6	19,2	26,9

Cuadro 59. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de SST

Eficiencia experimental del Keisya con máximos de SST							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	670,0	180,0	390,0	390,0	73,1	41,8	41,8
2,0	200,0	90,0	150,0	150,0	55,0	25,0	25,0
3,0	1970,0	2620,0	2980,0	2980,0	-33,0	-51,3	-51,3
4,0	250,0	160,0	240,0	240,0	36,0	4,0	4,0

Cuadro 60. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de SST

Eficiencia experimental del Keisya con mínimos de SST							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	50,0	50,0	80,0	50,0	0,0	-60,0	0,0
2,0	40,0	10,0	10,0	10,0	75,0	75,0	75,0
3,0	30,0	150,0	50,0	50,0	-400,0	-66,7	-66,7
4,0	90,0	20,0	50,0	20,0	77,8	44,4	77,8

Cuadro 61. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando el promedio de DQO

Eficiencias experimental del Keisya con promedio de DQO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	461,8	340,5	299,0	319,8	26,3	35,2	30,8
2,0	332,2	208,8	183,4	196,1	37,1	44,8	41,0
3,0	526,0	400,0	341,8	370,9	24,0	35,0	29,5
4,0	303,0	168,0	209,3	188,7	44,6	30,9	37,7

Cuadro 62. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores máximos de DQO

Eficiencia experimental del Keisya con máximos de DQO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	681,0	498,0	405,0	498,0	26,9	40,5	26,9
2,0	446,0	397,0	220,0	397,0	11,0	50,7	11,0
3,0	820,0	590,0	376,0	590,0	28,0	54,1	28,0
4,0	344,0	178,0	231,0	231,0	48,3	32,8	32,8

Cuadro 63. Eficiencias experimentales del Keisya utilizando valores mínimos de DQO

Eficiencia experimental del Keisya con mínimos de DQO							
Caudal (L/min)	Entrada Keisya (mg/L)	Salida torre 1 (mg/L)	Salida torre 2 (mg/L)	Salida Keisya (mg/L)	Eficiencia torre 1 (%)	Eficiencia torre 2 (%)	Eficiencia Keisya total (%)
1,0	377,0	254,0	233,0	233,0	32,6	38,2	38,2
2,0	249,0	99,0	121,0	99,0	60,2	51,4	60,2
3,0	400,0	201,0	303,0	201,0	49,8	24,3	49,8
4,0	240,0	155,0	193,0	155,0	35,4	19,6	35,4

Para realizar una comparación de las eficiencias del filtro biológico tipo Keisya y el filtro percolador, se realiza el cálculo de las eficiencias de este último para los parámetros de DBO, DQO y SST con los resultados obtenidos en esta investigación.

Cuadro 64. Eficiencias experimentales del filtro percolador utilizando valores promedio de DBO, DQO y SST

Eficiencia experimental del filtro percolador			
Parámetro	Promedio Entrada Filtro Percolador (mg/L)	Promedio salida Filtro percolador (mg/L)	Eficiencia experimental filtro percolador (%)
DBO	63,07	64,93	-2,96
DQO	407,56	329,44	19,17
SST	295,33	388,67	-31,60

CAPÍTULO 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se realiza el análisis de los resultados obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica presentados en la sección anterior. Este análisis se encuentra enfocado en el funcionamiento del filtro biológico tipo Keisya localizado de manera experimental dentro de la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal, asimismo, se realizarán análisis de los resultados obtenidos en los demás sistemas ubicados dentro de la planta de tratamiento y su influencia en el funcionamiento del Keisya.

8.1 Análisis cualitativo del filtro biológico tipo Keisya

En esta sección se realiza un análisis cualitativo de las condiciones del filtro biológico tipo Keisya durante la experimentación realizada.

Para cada caudal de estudio se aforó el sistema diariamente para cumplir con la carga estipulada, esto gracias a la ayuda de los operarios de la PTAR.

Durante la experimentación fue común observar obstrucciones de aguas residuales en el Keisya principalmente con los caudales de 3 y 4 L/min en cada torre, las cuales se tuvieron que eliminar introduciendo una mano debidamente protegida con guantes que permitiera detectar el punto de obstrucción. Lo anterior se puede observar en la Figura 142 donde dicha foto fue tomada durante la aplicación de 4 L/min que resultó en saturación y derrames de agua en el sistema.



Figura 142. Saturación de agua en el Keisya

Después del último muestreo con el caudal de 4 L/min realizado el 02 de noviembre del 2020, el Keisya presentó una fuga en la tubería de salida de la torre 1, por lo que fue necesario esperar para la reparación realizada que se puede observar en la Figura 143.



Figura 143. Reparación realizada en la tubería de salida de la torre 1

Al construirse el Keisya en el año 2019 para la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal se utilizaron cajas de poliestireno, en las cuales se introdujeron las esponjas y se abrió paso a las aguas residuales. Conforme pasaron los meses se comenzaron a observar agrietamientos en las cajas debido a insectos, por lo que se toma la decisión de colocar un revestimiento para proteger el poliestireno. Después, se da inicio a este proyecto de experimentación, sin embargo, aunque las cajas se protegieron para evitar futuras grietas, el sistema ya se encontraba bastante dañado por las grietas y la humedad por lo que las condiciones del sistema para el estudio no eran las ideales, siendo esto una limitación del proyecto.

Lo anterior se muestra en las Figura 144 y Figura 145 donde en esta última se observa que a la entrada del agua residual el musgo logró abarcar gran parte de la caja.



Figura 144. Daños en la estructura del Keisya



Figura 145. Afectación de la humedad en la estructura del Keisya

Asimismo se puede observar en la Figura 146 como la humedad también afecta la estructura externa de las cajas de poliestireno y la estructura de soporte.



Figura 146. Condiciones físicas externas del Keisya

Durante la experimentación se colocaron plantas en las cajas superiores de la unidad del filtro biológico tipo Keisya (Figura 147) para que estas contribuyeran en la remoción. Además, fue común encontrar la presencia de vectores como moscas, mosquitos y tijeretas.



Figura 147. Crecimiento de vegetación en el Keisya

8.2 Análisis de resultados de parámetros de control

8.2.1 Potencial de hidrógeno

El potencial de hidrógeno (pH) en el Keisya para los cuatro caudales aplicados presenta valores promedios superiores a 7 e inferiores a 8, con una varianza inferior al 0,12 lo que implica que la variabilidad de los datos muestreados de pH es muy baja.

En términos generales el comportamiento de los valores del pH a la salida de ambas torres del Keisya son ideales para el vertido según el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas residuales.

Al analizar a la unidad de tratamiento Keisya con los cuatro caudales de estudio se observa que a la entrada de la planta piloto(salida UASB) la mediana de los valores de pH son menores que a la salida de la torre 1 y 2 del Keisya. Sin embargo, tanto

a la entrada como a la salida del Keisya, estos valores se encuentran dentro del rango de 5 a 9 de pH, siendo un parámetro que se cumple con satisfacción.

8.2.2 Conductividad

Al analizar el comportamiento de la planta piloto tipo Keisya con respecto a la conductividad eléctrica se puede observar que el promedio de datos es mayor a la entrada del Keisya (salida UASB) que a la salida de este para los caudales de 1, 2 y 4 L/min, lo que nos permite decir que el Keisya disminuye las impurezas y sales disueltas presentes en el agua residual, disminuyendo al mismo tiempo la corriente eléctrica que pasa a través de esta. Mientras que para el caudal de 3 L/min la conductividad eléctrica aumenta relativamente poco pasando de 1069,78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a la entrada, a 1092,50 y 1088,38 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a la salida de ambas torres de la planta piloto.

Los resultados obtenidos de conductividad eléctrica demuestra que tanto la torre izquierda como la torre derecha del Keisya presentan valores similares a su salida, esto se determina comparando tanto el promedio como su varianza.

Las aguas residuales urbanas presentan una conductividad eléctrica con valores en el rango de 500 a 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y los valores obtenidos en la investigación de la planta piloto tipo Keisya se encuentran dentro de este rango.

Al comparar los resultados obtenidos a la salida del filtro percolador y a la salida del Keisya se puede observar que los valores son relativamente similares, donde en la mayoría de los casos el Keisya presenta un valor promedio menor de conductividad eléctrica que el filtro percolador.

8.2.3 Sólidos disueltos totales

Con los valores obtenidos se puede observar la variabilidad que presentan los resultados de sólidos disueltos totales a lo largo de su paso por la PTAR Santa Cecilia de Puriscal y la planta piloto tipo Keisya.

Con los valores promedio se puede analizar el comportamiento a la entrada del Keisya (salida UASB) y a la salida de este con los diferentes caudales estudiados, donde ambas torres del sistema disminuyen la cantidad de sólidos disueltos en las aguas residuales.

De igual forma sucede al observar el comportamiento del filtro percolador y el Keisya, donde este último remueve mayor cantidad de sólidos disueltos totales con los diferentes caudales de estudio aplicados.

Con respecto a la remoción de sólidos disueltos totales, ambas torres presentan un comportamiento muy similar, donde los resultados obtenidos a la salida de cada una son relativamente iguales.

El caudal de estudio del Keisya que presenta los mayores valores de sólidos disueltos totales es el de 3 L/min, aunque el valor a la entrada del Keisya con este caudal no es el mayor, lo que indica que con esta carga el sistema está realizando menor remoción de este parámetro que con los demás caudales.

8.2.4 Oxígeno disuelto

Con respecto al oxígeno disuelto el filtro biológico tipo Keisya recibe una menor cantidad de este parámetro de la que vierte al sedimentador secundario, lo cual como fue explicado anteriormente se debe a que esta unidad de tratamiento es aeróbica y propicia la generación de oxígeno en las aguas residuales.

El comportamiento de ambas torres de la planta piloto es muy similar tanto el promedio como en la varianza. Con el caudal de 2 L/min se vierte mayor cantidad de oxígeno disuelto al sedimentador secundario, por el contrario con el caudal de 3 L/min se vierte la menor cantidad de este parámetro. Sin embargo la diferencia entre los valores obtenidos con los diferentes caudales es muy pequeña.

Al compararse el oxígeno disuelto del filtro percolador y del Keisya, se puede observar que al tener el caudal de 2 L/min el Keisya logra tener valores mayores de la media de oxígeno disuelto que el filtro percolador, permitiendo la respiración de los microorganismos y seres aerobios presentes en el agua residual.

Por el contrario, con los caudales de 1, 3 y 4 L/min aplicado en el filtro biológico tipo Keisya, la media de los valores del filtro percolador presenta resultados mayores de oxígeno disuelto que la planta piloto.

8.3 Análisis de resultados de nutrientes

8.3.1 Nitrito

La presencia de nitritos en el agua es un indicador de la existencia de materia fecal en las aguas residuales. En la entrada del Keisya (Salida UASB) los valores de nitrito son constantes en un rango del 0,012 a un 0,17 mg/L como máximo resultado, y estos valores aumentan considerablemente a la salida del Keisya en ambas torres, siendo superior en la torre 1 del Keisya, la cual presenta un valor correspondiente a 1,47 mg/L con el caudal de entrada a la planta piloto de 1 L/min.

Asimismo, el filtro percolador también contribuye en la formación de nitrito, lo anterior quiere decir que el filtro biológico tipo Keisya y el filtro percolador están contribuyendo en gran manera a la oxidación biológica del agua residual gracias a la presencia de bacterias nitrificantes en el sistema.

Lo anterior es un patrón que se observa mayoritariamente en la investigación, sin embargo está la excepción del caudal de 4 L/min en la entrada a cada torre del Keisya donde los valores de nitrito disminuyen considerablemente en este sistema pero se mantienen altos en la salida del filtro percolador, por lo que la entrada de un flujo de agua residual mayor al de diseño del Keisya impide que las bacterias nitrificantes realicen su labor de oxidación biológica de manera ideal.

8.3.2 Nitrato

En el caudal de entrada de 1 L/min se muestra el máximo valor de 14 mg/L en la torre del Keisya 2 esto debido a que al disminuir el caudal de entrada al sistema, permite mayor producción de nitrato gracias a la acción de las bacterias nitrificantes. Por el contrario al aumentar al caudal de fallo de 4 L/min en la entrada al Keisya se presenta una disminución considerable en la cantidad de nitrato del sistema, alcanzando valores máximos de 3 mg/L contra valores mayores (6, 9, 10 mg/L) en el filtro percolador que se encuentra en condiciones de funcionamiento regulares.

Para los cuatro caudales de estudio en el Keisya se puede observar en los gráficos de cajas que la mediana de los valores de nitrato en ambas torres son muy similares. Además, la varianza en ambas torres es baja exceptuando los muestreos realizados con el caudal de 1 L/min donde se obtiene una varianza de 22,50 mg/L.

Los valores de nitrato mostrados en el Cuadro 46 son mayores a los valores de nitrito mostrados en el Cuadro 45, debido a que los nitritos se forman con mayor lentitud en los procesos biológicos.

8.3.3 Nitrógeno amoniacal

A continuación se analizan los resultados obtenidos de la prueba de nitrógeno amoniacal realizado a las diecisiete muestras de agua residual. En los primeros trece muestreos correspondientes a los caudales de 2, 4 y 3 L/min en la entrada al filtro biológico tipo Keisya se tiene un promedio de 1,74 mg/L y una mediana de 1,05 mg/L, mientras que en los últimos cuatro muestreos correspondientes al caudal de 1 L/min aplicado al Keisya, los valores de promedio y mediana son de 25,15 mg/L y 21,9 mg/L respectivamente, estando muy por encima de los resultados de los demás caudales.

Los valores del caudal de entrada de 1 L/min en el Keisya son muy elevados comparados a los demás muestreos, y al tener valores elevados desde la entrada a la PTAR significa que no es por la disminución del caudal de entrada al Keisya, sino por factores externos que llevaron a la producción elevada de nitrógeno amoniacal en las aguas residuales de Santa Cecilia de Puriscal.

Uno de los factores puede ser la estación en que se realizaron los últimos muestreos que fueron durante el mes de enero de temporada seca en el territorio nacional, por lo que la influencia de aguas pluviales debido a fugas en el alcantarillado llegan a disminuir, aumentando los valores de nitrógeno amoniacal producidos.

Observando el promedio y la varianza, se puede determinar que el comportamiento de ambas torres de la planta piloto tipo Keisya es muy similar en la remoción de nitrógeno amoniacal.

Al comparar el filtro percolador con el Keisya, en los caudales de 2 y 3 L/min en la entrada al Keisya este presenta valores menores de nitrógeno amoniacal, removiendo con mayor capacidad que el filtro. Por el contrario, con los caudales de 1 y 4 L/min los valores de nitrógeno amoniacal son mayores al salir del Keisya, aunque la variabilidad de los datos comparados el filtro percolador son mínimas.

8.3.4 Fósforo

Al analizar los resultados de fósforo en la PTAR se puede determinar que en gran parte de los muestreos es mayor la cantidad de fósforo producido en la salida de la torre 1 comparado a la salida de la torre 2, por lo que la capacidad de remoción de fósforo es menor en la torre 1, lo cual puede deberse a condiciones de la biomasa producida y su accionar sobre la remoción del fósforo, ya que en general ambas torres están construidas con los mismos materiales y bajo las mismas condiciones de carga.

En la entrada del Keisya (salida del UASB) los valores de fósforo son menores que a la salida de ambas torres del sistema, por lo que el Keisya no está removiendo el fósforo de las aguas residuales, por el contrario está aportando este nutriente, siendo el sedimentador secundario y los estañones de carbón activado los encargados de removerlo.

Al comparar el Keisya con el filtro percolador, este último presenta valores menores de fósforo en todas las condiciones de experimentación, por lo que el filtro tipo Keisya tiene un mayor potencial para la implementación de una unidad de recuperación de fósforo al propiciar una mayor liberación de dicho elemento en su efluente.

Además, los valores críticos se obtienen en los muestreos realizados desde la semana diez hasta la 17, lo cual puede deberse a que fueron realizados durante la época seca con menor influencia de las aguas pluviales provenientes de conexiones ilícitas.

8.4 Análisis de resultados de sólidos

En los resultados de los sólidos se puede observar que las primeras dos semanas de muestreo no se encuentran disponibles, esto debido a fallas en la experimentación y pérdida del agua muestreada, por lo cual se inicia con la muestra 3 hasta finalizar en la muestra 17.

8.4.1 Sólidos totales

Con la aplicación del caudal de 1 L/min en la entrada del Keisya se observa que los valores promedio de sólidos totales a la salida de la planta piloto son inferiores a los de la entrada (salida UASB), por lo que el sistema contribuye a la remoción de sólidos totales. Lo contrario sucede con el caudal de 3 L/min en la entrada al Keisya y en el caso del caudal de 2 L/min los valores son muy similares por lo que no se puede llegar a esta conclusión anterior.

En el caso del caudal de 4 L/min en la entrada al Keisya se presentan valores muy similares a la entrada y salida, aunque estos resultados son levemente mayores en la entrada por lo que se puede concluir que con este caudal el Keisya tiene mayor capacidad de remoción de sólidos totales.

Al realizar la comparación del filtro percolador con el Keisya, se puede observar al analizar la mediana que el Keisya presenta para los cuatro caudales la característica de que la mitad de los valores de sólidos totales son inferiores a la mitad de los valores del filtro percolador.

8.4.2 Sólidos suspendidos totales

Cuando se utiliza un caudal de entrada al Keisya de 3 L/min, los valores de SST aumentan de la entrada a la salida del Keisya, por lo que con este caudal el sistema no cumple con el objetivo de remoción esperado.

Por el contrario, con el caudal de 1 L/min en la entrada al Keisya, se presenta una disminución de los SST desde la salida del UASB a la salida del Keisya, realizando una remoción significativa en la torre 1. Lo anterior también sucede en menor magnitud con el caudal de 2 L/min.

Además, se observa que para ambos caudales la mediana de la torre 2 es mayor a la mediana de la torre 1 lo que quiere decir que en el caso de la torre 2 la mitad de los muestreos realizados dieron un valor más alto de SST, por lo que realizó menor remoción. Lo mismo sucede al comparar la torre 2 con la salida del UASB (entrada Keisya) aunque esta última alcance valores mayores.

Es importante explicar que las condiciones de estudio de ambas torres son idénticas, donde se les afora un caudal de entrada de igual magnitud, fueron construidas con

los mismos materiales y dimensiones, por lo que la diferencia en el accionar de estas se atribuye a la propia generación de biomasa y la forma en que esta trata al agua residual.

Por otro lado, con el caudal de entrada al Keisya de 4 L/min se observa una disminución de los SST en el proceso de remoción que realiza el sistema Keisya. En estos muestreos, la entrada a la PTAR tiene gran variabilidad en los valores de SST, mientras que los demás sistemas tiene menor variabilidad.

Con los caudales de entrada al Keisya de 1, 2 y 4 L/min se observa que la remoción de SST es mayor en la planta piloto tipo Keisya. Pero al aplicársele un caudal de 3 L/min al Keisya este tiene valores promedio de salida iguales o superiores a los valores promedio del filtro percolador.

8.4.3 Sólidos volátiles

Con el caudal de entrada de 1 L/min al Keisya, se puede determinar que la torre 1 presenta la mayor variabilidad de datos de sólidos volátiles. En este caso la entrada al Keisya (salida UASB), tiene valores menores de sólidos volátiles, por lo que el sistema Keisya está contribuyendo a la generación de estos. Si se analiza con la mediana se puede observar en la torre del Keisya 1 la mitad de los valores de sólidos volátiles son mayores que los de la salida del UASB y la torre del Keisya 2, por lo que esta torre es la que tiene mayores fallas en remoción.

Muy similar a lo anterior sucede con el caudal de 4 L/min, ya que los valores de sólidos totales en la torre 1 son superiores a los de la entrada al Keisya, pero en este caso la torre 2 presenta mejor remoción de sólidos volátiles que la torre 1.

Si se comparan las dos torres del Keisya con los cuatro caudales empleados, en todos los casos la torre 2 logra remover mayor cantidad de sólidos volátiles que la torre 1. Con el caudal de 2 L/min se presentan valores muy similares a la entrada del Keisya y a la salida, con un ligero aumento de sólidos totales al salir del sistema.

En el caso del caudal de entrada al Keisya de 3 L/min (Figura 122) se observa que ambas torres presentan valores menores de sólidos volátiles que a la entrada del sistema. Pero contrario a los demás caudales la mediana de la torre 2 es mayor a la

mediana de la torre 1, por lo que la mitad de los valores de sólidos volátiles de la torre 2 son mayores.

Para los caudales de 1, 2 y 4 L/min a la entrada del Keisya se puede observar que el filtro percolador tiene mejor remoción de los sólidos volátiles. Lo contrario sucede con el caudal de 3 L/min.

8.5 Análisis de resultados de DBO y DQO

Al analizar el comportamiento del Keisya se nota un patrón en los caudales de entrada de 1, 2, 3 y 4 L/min donde los valores de DQO a la entrada del Keisya (salida del UASB) son mayores que los valores a la salida de ambas torres del Keisya, por lo que el sistema está removiendo la DQO que recibe.

Con los caudales de 1, 2 y 3 L/min se observa mayor remoción de la DQO por parte de la torre 2 del Keisya donde la mitad de los datos medidos a la salida de esta son menores que la mitad de los datos muestreados en la torre 1. Caso contrario sucede con el caudal de 4 L/min donde la torre 1 del Keisya remueve con mayor eficiencia la cantidad de demanda química de oxígeno.

Al comparar el filtro biológico tipo Keisya con el filtro percolador, se puede observar en los gráficos de cajas que en su mayoría, la salida del filtro percolador presenta valores mayores de DQO que la salida de ambas torres del Keisya, por lo que en términos de remoción de DQO la planta piloto genera mejores resultados.

Con respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), los datos de entrada y salida del Keisya presentan gran variabilidad en los muestreos realizados. Con respecto al caudal de entrada al Keisya de 1, 3 y 4 L/min la mitad de los valores de la salida del UASB son menores a la mitad de los valores de salida de ambas torres del Keisya, por lo que el filtro a estos caudales contribuye a la generación de DBO. Por otro lado, con el caudal de 2 L/min se muestra que el sistema Keisya contribuye a la remoción de DBO ya que en ambas torres los valores de salida de este parámetro son menores a los de entrada. Lo anterior es lo esperado en sistemas aerobios ya que la influencia del oxígeno permite que la materia orgánica se estabilice por medio de la oxidación.

El funcionamiento de ambas torres tiende a ser muy variable, donde con el caudal de 1, 2 y 4 L/min la torre 2 tiene mejor capacidad de remoción, mientras que con el caudal de 3 L/min sucede lo contrario.

Al comparar el filtro percolador con el sistema Keisya se puede observar que para los caudales de 1, 2 y 3 L/min ambas torres del sistema remueven más DBO que el filtro percolador, sucediendo lo contrario con el caudal de 4 L/min.

Con respecto a la relación DBO/DQO, como se menciona anteriormente esta corresponde a un índice de medición de la biodegradabilidad, donde los valores menores a 0,2 en el efluente son considerados poco biodegradables y los mayores a 0,4 son muy biodegradables lo que facilita el tratamiento biológico.

Con el caudal de entrada al Keisya de 1 L/min se muestra que los valores a la salida del sistema tiene una mediana superior a los 0,2 por lo que son biodegradables con uno de los muestreos muy biodegradable. Similar a esto sucede con el caudal de 3 L/min.

El sistema Keisya presenta la mayor biodegradabilidad con el caudal de entrada al sistema de 4 L/min, donde todos los datos de salida son superiores a los 0,4. Caso contrario sucede con el caudal de 2 L/min donde todos los muestreos son inferiores a los 0,4 indicando baja biodegradabilidad.

Si comparamos estos resultados del Keisya con el filtro percolador, podemos determinar que en este último solo un muestreo es muy biodegradable, contrario al Keisya donde la torre 1 presenta cuatro muestreos y la torre 2 tiene cinco muestreos muy biodegradables. Lo que permite determinar que el filtro biológico tipo Keisya tiene mayor capacidad de biodegradabilidad que el filtro percolador.

8.6 Análisis de la eficiencia experimental del filtro biológico tipo Keisya

Las eficiencias experimentales se realizaron tomando en cuenta el promedio de datos de DBO, DQO y de SST, además de sus valores mínimos y máximos. Estos valores se analizan individualmente y se comparan con los obtenidos por el estudiante Motoy Miyake en su proyecto "Removal of sewage in Costa Rica by Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and Keisya system" realizado en la PTAR Santa Cecilia de Puriscal, en el cual la planta piloto tipo Keisya fue sometida únicamente a un caudal

de 2 L/min. Además, se realiza una comparación con el experimento Keisya de aguas grises realizado en Japón.

Al analizar las eficiencias experimentales de DBO se observa que el Keisya presenta las mejores eficiencias al usar el caudal de 2 L/min, mientras que en los demás caudales experimentados estas eficiencias son negativas, es decir el Keisya está aportando DBO a las aguas residuales.

En el siguiente cuadro se observa la calidad de agua a la entrada del Keisya de Puriscal y del experimento con aguas grises realizado en Japón, para una mejor apreciación de las condiciones de las investigaciones para su comparación.

Cuadro 65. Calidad del agua residual a la entrada del Keisya y del experimento de aguas grises en Japón

Parámetro	Experimento aguas grises Japón	Entrada Keisya (Salida UASB)
pH	5,70	7,25
DBO (mg/L)	819,00	63,07
DQO (mg/L)	542,00	407,56
Fósforo (mg/L)	5,88	22,39
Sólidos suspendidos (mg/L)	153,00	295,00

La eficiencia con el caudal de 2 L/min del sistema Keisya es de 63,9%. Por otro lado, la eficiencia del experimento del Keisya para aguas grises provenientes de la cocina realizado en Japón (Anexo B.1) tiene un valor de 83% por lo que la eficiencia obtenida en el Keisya de Puriscal es menor, y como característica particular la entrada al filtro en Japón tiene aproximadamente 13 veces mayor concentración de DBO que el ubicado en Costa Rica.

Sin embargo, es complicado realizar una comparación entre ambas investigaciones cuando estas tienen objetivos y condiciones diferentes de estudio, como por ejemplo:

- La estructura del estudio japonés corresponde a un set con tres cajas, lo que implica disminución del área.

- Este estudio se encarga del tratamiento de aguas grises provenientes de la cocina de una casa con 4 habitantes sin la aplicación de un caudal constante o variación de estos como en el caso de esta investigación.

Con respecto a los SST el sistema presenta las mejores eficiencias con los caudales de 1 y 2 L/min con un valor de remoción de 32,9%, mientras que con el caudal de 4 L/min presenta un valor de remoción de 26,9%.

En el proyecto de Motoy Miyake se establece que los valores de remoción del Keisya en Puriscal fueron menores a los obtenidos en el experimento realizado en Japón el cual tiene un valor de remoción de 74%, sin embargo no se estipula un valor específico. Lo mismo sucede con este proyecto, ya que para todos los caudales el porcentaje de remoción es menor al 74% del proyecto realizado en Japón. Lo cual se justifica porque la concentración de sólidos totales a la entrada del Keisya de Puriscal es casi el doble que la del proyecto de Japón.

Además, se puede resaltar que el porcentaje de remoción de SST es menor en la torre 2 que en la torre 1, lo cual puede deberse a obstrucciones a la entrada y en la estructura, ya que en muchos casos era necesario la vigilancia por parte de los operarios para retirar dichas obstrucciones en las torres.

Con respecto a las eficiencias de remoción de DQO, contrario a las analizadas anteriormente para el DQO y SST, en este caso el sistema Keisya remueve DQO en los cuatro caudales de estudio presentando todos los valores en positivo. Al igual que con el DBO, el caudal con mayor porcentaje de remoción es el de 2 L/min con un valor de 41%, mientras que en los caudales de 1,3 y 4 L/min es de 30,8%, 29,5% y 37,7% respectivamente.

La eficiencia del Keisya en el proyecto de Motoy Miyake tiene un porcentaje de remoción de 53% y en el experimento de Japón con aguas grises es del 78%. Ambos casos presentan mayores eficiencias que con los cuatro caudales de este proyecto, lo que se podría justificar a que el estado del Keisya se ha visto deteriorado desde su construcción hasta la fecha de este proyecto, presentando obstrucciones, derrames de agua, agrietamientos y daños en la estructura de soporte como las cajas de poliestireno y la madera.

Al comparar los valores de las eficiencias experimentales del filtro percolador ubicado en la PTAR de Santa Cecilia de Puriscal con los del Keisya, se puede confirmar que respecto al DQO con los cuatro caudales empleados en la entrada al Keisya es mayor la eficiencia de remoción del Keisya (30,8%, 41%, 29,5% y 37,7%) comparada a la del filtro percolador la cual es de 19,17%. Lo mismo sucede con el proyecto final de graduación de Chacón, 2019 donde obtiene un valor de eficiencia del DQO de 20,10% (Cuadro D.1.2)

Es importante recalcar que la variación de caudales de entrada solo se aplica al entrar Keisya, ya que el caudal a la entrada del filtro percolador no se aforaba para este estudio.

Con respecto al DBO la eficiencia de remoción del caudal de 2 L/min a la entrada a cada torre del Keisya es de 63,9%, y este valor es mayor a la eficiencia de remoción del filtro percolador obtenida en este estudio que corresponde a -2,96%. Lo contrario sucede con los caudales de 1, 3 y 4 L/min en la entrada al Keisya ya que los valores son de -4%, -36,5% y -124,6% respectivamente, por lo que la eficiencia de remoción de DBO del filtro percolador es superior a la del Keisya con estos caudales de entrada.

En el caso del estudio de Chacón, 2019 la eficiencia de remoción del DBO es de 4,70%, por lo que de igual forma la eficiencia del Keisya continúa siendo mayor para el caudal de entrada de 2 L/min, pero no para los otros tres caudales.

Por último, la eficiencia de remoción de los sólidos suspendidos totales para los caudales de entrada al Keisya de 1, 2 y 4 L/min (32,9%, 32,9% y 26,9%) son superiores a la eficiencia del filtro percolador que tiene un valor de -31,9%, lo que indica que aporta sólidos suspendidos totales a las aguas tratadas. Caso contrario sucede con el caudal de 3 L/min de entrada al Keisya el cual tiene menor porcentaje de remoción que el filtro percolador.

Podemos observar que los resultados de SST presentan gran diferencia al comparar ambas torres, siendo este parámetro junto con los sólidos volátiles los que presentan mayor variabilidad en los datos entre torres, aunque con todos los parámetros y variando caudales también se presenta variabilidad. Lo anterior puede deberse a las

condiciones de creación de la biomasa, donde a pesar de tener las mismas características constructivas, la creación y el accionar de la biomasa es diferente.

CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Filtro biológico tipo Keisya

- En este proyecto se evaluó la efectividad de la unidad de tratamiento Keisya (filtro biológico) ubicado para su estudio en la planta de tratamiento de aguas residuales de la urbanización Santa Cecilia de Puriscal. Esta unidad corresponde a la primera realizada en Costa Rica, por lo que este proyecto es importante para conocer las distintas condiciones de carga a la cual puede ser sometida la estructura del Keisya y demás características de funcionamiento que permitan favorecer la creación de más filtros biológicos tipo Keisya en territorio nacional.
- El Keisya corresponde a una tecnología japonesa implementada para el tratamiento de aguas grises provenientes de la cocina, por lo que en este proyecto se observan variaciones en los resultados al tratarse del manejo de aguas residuales ordinarias, aunque estas han pasado por el tratamiento primario y el reactor UASB.
- Al implementarse el tiempo de retención hidráulica de 1,25 horas con el caudal de 4 L/min a la entrada de cada torre del Keisya (CHV de 19,14 m³/m³*día) se presentan fallas en la unidad de tratamiento como la saturación y derrames de agua por las paredes de la estructura de la planta piloto tipo Keisya, por lo que se concluye que para un buen funcionamiento del sistema se utilicen tiempos de retención hidráulica mayores correspondientes a caudales menores.
- Los valores de eficiencia experimental permiten determinar que el tiempo de retención hidráulica (TRH) que facilita el trabajo del filtro biológico tipo Keisya en las mejores condiciones físicas y obteniendo los mejores resultados es el de 2,51 horas correspondiente al caudal de 2 L/min y carga hidráulica volumétrica de 9,57 m³/m³*día. Se determina esta conclusión ya que el filtro tipo Keisya en estas condiciones presenta la eficiencia experimental mayor para los parámetros de DBO, DQO y SST.
- Con los resultados de eficiencias se puede concluir que el sistema con el TRH de 1,67 horas correspondiente al caudal de 3 L/min en la entrada al Keisya es el que genera mayor cantidad de eficiencias negativas, por lo que está

contribuyendo a la generación de DBO y SST, y además representa la eficiencia con menor de remoción de DQO, lo cual se debe a la saturación del sistema al sobrepasar su capacidad de carga.

- El filtro biológico tipo Keisya presenta las mejores eficiencias de remoción del parámetro de DQO al compararlo con las eficiencias de remoción de los parámetros de DBO y SST.
- La unidad de tratamiento Keisya en este proyecto presenta eficiencias experimentales menores que el mismo sistema cuando fue construido y estudiado en el año 2019, por lo que se considera que el principal causante de esto es el deterioro en la estructura, principalmente las cajas de poliestireno, las cuales por la humedad y accionar de los insectos presentaron agrietamientos causantes de pérdida de agua. Además, contrario al estudio de Motoy, 2019 en este proyecto de graduación se utilizaron caudales y TRH que pusieron el sistema a trabajar en condiciones críticas.
- Las eficiencias experimentales del Keisya son menores a las eficiencias obtenidas en el estudio realizado en Japón para aguas provenientes de la cocina, donde uno de los principales motivos es que en este proyecto se utilizaron aguas residuales ordinarias que sin duda alguna presentan mayor cantidad de contaminantes que las aguas grises. Otro motivo es que en esta investigación se trataron las aguas residuales de una urbanización formada por aproximadamente 160 habitantes y el estudio en Japón correspondía a una casa para 4 habitantes. Además, en este estudio el Keisya es sometido a tiempos de retención hidráulicas, cargas y caudales para llevarlo al fallo para descubrir el comportamiento del filtro ante distintas condiciones.
- Las torres 1 y 2 del Keisya se elaboraron con la misma configuración y el sistema se aforaba con el mismo caudal para ambas torres, sin embargo, en gran cantidad de casos los resultados obtenidos variaron entre ambas torres, lo cual se justifica porque en muchas ocasiones se presentaban obstrucciones en las torres que impedían el correcto funcionamiento de la unidad de tratamiento. Asimismo, el caudal de entrada variaba en ambas torres conforme pasaban los

días del aforo realizado, por lo que esta diferencia puede ser un causante de los resultados obtenidos. Por último, el crecimiento de biomasa se puede presentar de distinta forma en ambas torres, variando la purificación del agua. En conclusión el filtro tipo Keisya puede ser susceptible o sensible a los eventos de variación o intermitencia de caudal.

- Las eficiencias experimentales del Keisya para la remoción del parámetro de DQO son mayores a las eficiencia del filtro percolador. Con respecto a la eficiencia de remoción de DBO, el Keisya presenta mejores condiciones comparado al filtro percolador, cuando la planta piloto es sometida a un caudal de 2 L/min, por el contrario con los caudales de 1, 3 y 4 L/min en el Keisya, las eficiencias de remoción del filtro percolador son superiores a este.

Por último, con un caudal de entrada al Keisya de 1, 2 y 4 L/min este presenta mejores eficiencias de remoción de SST que el filtro percolador, mientras que con el caudal de 3 L/min el Keisya presenta menores eficiencias. Por lo que se concluye que con un caudal de 2 L/min el Keisya tiene mejores eficiencias de remoción de DQO, DBO y SST comparado al filtro percolador.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Cecilia de Puriscal

- Con respecto al vertido de la PTAR, en dos ocasiones el parámetro de DBO no cumple con el Reglamento de Vertido y Reúso de aguas residuales. Lo anterior sucede en seis ocasiones para el DQO, diez para los SST y una para el pH, lo que se puede justificar como un fallo en la remoción de estos parámetros en la PTAR el cual debe ser mejorado. La incorporación de materia orgánica en los sistemas de tratamiento o el ingreso a la PTAR de gran cantidad de materia orgánica pueden ser los causantes de este problema.
- Al analizar las pruebas realizadas por el Laboratorio Nacional de Aguas para los parámetros de DBO, DQO y SST con las pruebas realizadas en esta investigación se puede determinar que el vertido de la PTAR no siempre cumple con el reglamento lo cual corresponde a fallos en la operación del sistema que provoca el aumento de la contaminación al verter aguas residuales en condiciones no aptas para el cuerpo receptor.

- A pesar de que la mayoría de pruebas del Laboratorio Nacional de Aguas fueron realizadas en diferente tiempo que las pruebas de este estudio, se muestra gran similitud en los datos obtenidos en esta investigación.
- El potencial de hidrógeno es el único parámetro que cumple en su totalidad el límite de vertido.
- Con respecto a las condiciones de oxigenación se concluye que los valores de oxígeno disuelto son muy bajos para el reactor UASB ya que es un sistema anaerobio. Mientras que para el filtro percolador y el Keisya estos valores aumentan por ser sistemas aerobios, excepto para el caudal de 3 L/min donde el Keisya presenta condiciones de oxígeno disuelto muy inferiores cercanas a los valores presentados en el UASB.

RECOMENDACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Filtro biológico tipo Keisya

- Al momento de construirse una nueva estructura para el Keisya es importante colocarle un revestimiento a las paredes de las cajas de poliestireno para evitar que el agua residual genere daños causados por la humedad e insectos. Desde el 07 de agosto del 2021 en Costa Rica es prohibido el uso de poliestireno, por lo que en un material sustituto para el Keisya es el plástico y el bambú, aunque es necesario realizar una correcta experimentación con estos materiales para garantizar su efectividad. Además, se recomienda que la estructura de soporte sea de un material capaz de ser sometido al impacto de humedad e insectos como el acero o madera protegida.
- Se considera importante proteger el Keisya con un plástico o un techo que impida la afectación de las aguas pluviales en el tratamiento de las aguas residuales y a la estructura.
- Se recomienda realizar un monitoreo constante a la planta piloto tipo Keisya construida a escala, ya que debido a su configuración y al caudal de entrada, esta es muy propensa a sufrir obstrucciones que impiden el correcto funcionamiento. Asimismo, el ingreso del caudal a la unidad depende de la cantidad de agua entrando a la PTAR por lo que se recomienda monitorear el caudal con el que se encuentra la unidad de tratamiento.
- Es recomendable utilizar en la unidad de tratamiento Keisya un tiempo de retención hidráulica de 2,51 horas que corresponde a un caudal de entrada para cada torre de 2 L/min y una carga hidráulica volumétrica de 9,57 m³/m³*día total en el filtro, ya que con estos parámetros el filtro biológico presentó las mejores eficiencias de remoción de DBO, DQO y SST.
- Se recomienda la implementación del Keisya como unidad de post tratamiento del Reactor UASB ya que como se confirma en este estudio, la unidad del Keisya realiza buenas labores de remoción de contaminantes. También se recomienda la colocación de unidades de tratamiento secundario y terciario después del

Keisya, porque este a pesar de remover contaminantes no cumple con los valores de vertido estipulados por reglamentación nacional.

- Se recomienda realizar más investigaciones para poder confirmar la efectividad en la implementación del Keisya como unidad de post tratamiento del reactor UASB, y la implementación de este como posible sustitución del filtro percolador ya que como se ha visto en la experimentación, las eficiencias de remoción del Keisya superan en su mayoría a las del filtro percolador.
- Para investigaciones futuras de este Keisya se recomienda realizar una investigación del Keisya a una carga hidráulica volumétrica de $9,57 \text{ m}^3/\text{m}^3\cdot\text{día}$ y un caudal de 2 L/min en cada torre constante por 12 meses contemplando la influencia de la estación lluviosa y seca en el filtro, para tener un conjunto de resultados que permitan determinar con mejor precisión la eficiencia del filtro percolador a este caudal. Lo anterior siempre y cuando se que se restaure la infraestructura y se le de el mantenimiento adecuado.
- Con respecto a investigaciones futuras de una nueva planta piloto a escala tipo Keisya, se recomienda estudiar materiales de soporte distintos a las esponjas de poliuretano, como el suelo y rocas porosas como las escorias volcánicas. Además, se recomienda realizar cambios en la escala del sistema que permitan determinar la variación en la eficiencia de la unidad si se cambia a una escala menor o mayor. Y por último, se recomienda la implementación del Keisya con entrada de aguas residuales con una menor carga orgánica, para determinar su funcionamiento y posibles cambios de tamaño de la estructura.

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Cecilia de Puriscal

- Es importante realizar monitoreo, limpieza y mantenimiento constante a las unidades de tratamiento para mejorar el problema del incumplimiento de vertido, por esto se recomienda que la PTAR reciba mantenimiento durante los fines de semana.
- Las unidades de tratamiento de aguas residuales de la PTAR Santa Cecilia están diseñados para caudales mayores al de entrada, el cual es muy reducido y en época seca se tiende a agravar la situación, por lo que se recomienda la

colocación de un tanque de homogenización que permita la entrada de caudales constantes a la PTAR.

- Se recomienda dar mantenimiento a los sistemas mecánicos del filtro percolador para evitar fallas en el brazo giratorio como sucedió durante el mes de noviembre del 2020 en que se pausaron los muestreos.
- Se recomienda realizar las reparaciones de las componentes de la PTAR durante la misma semana en que sucedió la falla y no semanas después ya que las aguas residuales necesitan ser tratadas correctamente para garantizar el cumplimiento del vertido en reglamento y no afectar al cuerpo de agua receptor.
- Es recomendable realizar una revisión de los valores teóricos de eficiencias de remoción de los componentes de la PTAR y compararlos con los valores obtenidos en el estudio, para verificar dónde están los fallos en el cumplimiento de vertido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUASTAT (s.f). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)*. Obtenido de: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?lang=es&keywords=Agua+residual&submit=Buscar&subjectId=-1&submitBtn=-1&p=100&termId=-1>
- Badilla, G. (2012). Manual de Operación y Mantenimiento Sistema de Tratamiento Santa Cecilia, Puriscal. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Cajigas, A. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Madrid, España. McGraw Hill.
- Centeno, E., Rodríguez, D., & Ugalde, J. L. (2017). *Evaluación de una planta piloto para el tratamiento de aguas*. San José: UCR.
- Chacón, Y. (2019). *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*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Chamy, R., Vivanco, E., & Yaya, R. (s.f). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*. Programa Iberoamericano. Ciencia y Tecnología para el desarrollo CYTED. Obtenido de: http://www.cytcd.org/sites/default/files/tratamiento_anaerobio_de_aguas_residuales.pdf
- CIDTA. (s.f.). Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (Universidad D Salamanca). Obtenido de <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>
- Demanda Química de Oxígeno (s.f). Hannah Instruments. Obtenido de: <https://www.hannainst.es/blog/81/demanda-quimica-de-oxigeno>

- García, J. Pérez, P., & Rancaño, A. (2012). *Manuel de operación y mantenimiento de EDARS en pequeñas poblaciones*. España.
- García, V. (2018). *Universidad de Costa Rica*. Obtenido de: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/03/26/70--del-agua-residual-generada-por-costarricenses-carece-de-tratamiento.html>
- GEDAR. (s.f). *Filtro percolador*. Obtenido de: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/filtros-percoladores.htm>
- González, L. (2013). *Nitrógeno amoniacal: importancia de su determinación*. Obtenido de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjQiOnK_dvvAhWpct8KHWbPAP0QFjAKegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Frevistas.utp.ac.pa%2Findex.php%2Fmente-y-materia%2Farticle%2FviewFile%2F334%2Fpdf&usg=AOvVaw1zB6K056y3MAeDhWz36T20
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados AyA. (2018). *Ficha técnica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la urbanización Santa Cecilia de Puriscal*. San José, Costa Rica.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados AyA (2020). Sistema de tratamiento de aguas residuales: Reporte operacional 01-2020. San José, Costa Rica.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados AyA (2020). Sistema de tratamiento de aguas residuales: Reporte operacional 02-2020. San José, Costa Rica.
- Instituto de Desarrollo Rural Inder. (2014). Informe de Caracterización Básica Territorio Turrubares-Puriscal- Mora-Santa Ana. San José, Costa Rica.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC (2011). Costa Rica: Población total por lugar de nacimiento, según provincia de residencia actual y sexo. Obtenido de: <https://www.inec.cr/censos/censos->

2011?keys=población&at=All&prd=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=

- Knobelsdorf, M. (2005). *Eliminación biológica de nutrientes en un aru de baja carga orgánica mediante el proceso VIP*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/39426677_Eliminacion_biologica_de_nutrientes_nitrogeno_y_fosforo_mediante_un_proceso_discontinuo_de_fangos_activados
- López, S., & Martín, S. (2015). *Depuración de aguas residuales*. Obtenido de: <https://books.google.co.cr/books?id=9cJWDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=aguas+residuales&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiz1Prb8sroAhVNSN8KHQ4HBu8Q6AEILjAB#v=onepage&q=aguas%20residuales&f=false>
- Lorenzo, Y. Obaya, M. (2006). *La digestión anaerobia y los reactores UASB*. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2007). *Reglamento de Vertido y Reúso de aguas residuales*. Costa Rica.
- Miyake, M. (2020). *Removal of sewage in Costa Rica by Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) and Keisya system*. Universidad de Kagawa. Japón.
- Noyola, A. Morgan, J. Güereca, L. (2013). *Selección de Tecnologías para el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-111-Eschema-de-un-filtro-percolador_fig2_287975365
- Nurmiyanto, A. Ohashi, Akiyoshi. (2019). *Downflow Hanging Sponge (DHS) Reactor for Wastewater Treatment*. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/332943289_Downflow_Hanging_Sponge_DHS_Reactor_for_Wastewater_Treatment_-_A_Short_Review
- Pérez, C. León, F., & Delgadillo, G. (2013). *Tratamiento de aguas: Manual de Laboratorio*. Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de:

- http://portal.cuautitlan.unam.mx/manuales/tratamientodeaguas_manualprac.pdf
- Raffo, E., Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Ramalho, R.S. (s.f). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (Universidad de Salamanca)*. Obtenido de: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/pretratamientos_tratamientos_primarios.pdf
- Rodríguez, 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*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Solís, K. (2018). *Evaluación del modelo escala de biomasa suspendida por medio de esponjas colgantes de flujo descendente (DHS) como postratamiento de un reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Teixeira, G; Sánchez, I; Gebara, Dib; Dall'Aglio, M; Matsumoto, T. (2013). Remoción de fósforo de diferentes aguas residuales en reactores aeróbicos de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. Universidad de Antioquia, Colombia. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/pdf/430/43029146015.pdf>
- Torres, A. (s.f). Análisis de aguas residuales. Laboratorio de Medio Ambiente. Diputación Provincial de Granada. Obtenido de: http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf

- Ushijima, Ken., Ito, Kango., Ito, Ryusei., Funamizu, Naoyuki. (2013). Tratamiento de aguas grises por medio del sistema de cámaras de suelos inclinadas. Hokkaido University. Obtenido de: https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/52266/1/EE50_62-68.pdf
- Water Boards California (2013). Programa regulatorio agrícola: Recursos para agricultores: nitrato en el agua potable. Obtenido de: https://www.waterboards.ca.gov/centralcoast/water_issues/programs/ag_waivers/docs/spanish_forms/nitratos_en_el_agua.pdf
- Weather Spark (s.f). El clima promedio en Santiago, Puriscal. Obtenido de: <https://es.weatherspark.com/y/15451/Clima-promedio-en-Santiago-Costa-Rica-durante-todo-el-año#Sections-Humidity>

ANEXOS

A. Memoria de cálculo

A.1 Cálculo de condiciones de muestreo del Keisya

Datos de diseño del Keisya para caudal de 1 L/min:

- Volumen del Keisya: 0,6 m³
 - Caudal: 1 L/min = 2,88 m³/d
- Cálculo de carga de DBO diaria a la entrada del Keisya con el promedio de los valores (S₀):

$$S_{0\text{ PROM}} = \frac{147 + 58 + 77}{3} = 94 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,094 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

Donde los valores promediados, corresponden a los resultados de DBO obtenidos para el caudal de 1 L/min a la entrada de la unidad de filtro biológico tipo Keisya.

- Cálculo de carga de DBO diaria a la entrada del Keisya con el valor máximo (S₀):

$$S_{0\text{ MAX}} = 147 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,147 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

- Cálculo de carga de DBO diaria a la entrada del Keisya con el valor mínimo (S₀):

$$S_{0\text{ MIN}} = 58 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,058 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

- Cálculo de carga de DQO diaria a la entrada del Keisya con el promedio de los valores (S₀):

$$S_{0\text{ PROM}} = \frac{409 + 377 + 681 + 380}{4} = 461,75 \frac{\text{mg}}{\text{L}} = 0,462 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

Donde los valores promediados, corresponden a los resultados de DQO obtenidos para el caudal de 1 L/min a la entrada de la unidad de filtro biológico tipo Keisya.

- Cálculo de carga de DQO diaria a la entrada del Keisya con el valor máximo (S_0):

$$S_{0\ MAX} = 681 \frac{mg}{L} = 0,681 \frac{kg\ DQO}{m^3}$$

- Cálculo de carga de DQO diaria a la entrada del Keisya con el valor mínimo (S_0):

$$S_{0\ MIN} = 377 \frac{mg}{L} = 0,377 \frac{kg\ DQO}{m^3}$$

- Cálculo de la carga de DBO a la entrada:

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

$$L_0 = 0,094 \frac{kg\ DBO}{m^3} * 2,88 \frac{m^3}{d}$$

$$L_0 = 0,271 \frac{kg\ DBO}{d}$$

- Cálculo de la carga de DQO a la entrada:

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

$$L_0 = 0,46 \frac{kg\ DBO}{m^3} * 2,88 \frac{m^3}{d}$$

$$L_0 = 1,329 \frac{kg\ DBO}{d}$$

- Cálculo del tiempo de retención hidráulica:

$$TRH = \frac{V_{keisya}}{Q_{entrada}}$$

$$TRH = \frac{0,6\ m^3}{2,88\ \frac{m^3}{d}} = 0,21\ d = 300,90\ min = 5,02\ h$$

- Cálculo de la carga hidráulica volumétrica:

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

$$CHV = \frac{1}{0,21\ d} = 4,79 \frac{m^3}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga hidráulica superficial:

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

$$CHS = \frac{2,88 \frac{m^3}{d}}{6,02 m^2} = 0,478 \frac{m^3}{m^2}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DBO:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,094 \frac{kgDBO}{m^3}}{0,6 m^3} = 0,451 \frac{kgDBO}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DBO con S_0 máximo:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,147 \frac{kgDQO}{m^3}}{0,6 m^3} = 0,706 \frac{kgDQO}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DQO con S_0 mínimo:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,058 \frac{kgDQO}{m^3}}{0,6 m^3} = 0,278 \frac{kgDQO}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DQO con S_0 promedio:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,46 \frac{kgDQO}{m^3}}{0,6 m^3} = 2,216 \frac{kgDQO}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DQO con S_0 máximo:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,681 \frac{kgDQO}{m^3}}{0,6 m^3} = 3,269 \frac{kgDQO}{m^3 * d}$$

- Cálculo de la carga orgánica volumétrica de DQO con S_0 mínimo:

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

$$COV = \frac{2,88 \frac{m^3}{d} * 0,377 \frac{kgDQO}{m^3}}{0,6 m^3} = 1,810 \frac{kgDQO}{m^3 * d}$$

A.2 Revisión de la eficiencia del filtro biológico tipo Keisya

- Cálculo de la eficiencia experimental del filtro biológico tipo Keisya (torre 1) obtenida de los valores promedio de DBO y SST:

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

$$E_{DBO} = \frac{94,0 \frac{mg}{L} - 90,3 \frac{mg}{L}}{94,7 \frac{mg}{L}} * 100 = 4,6 \%$$

$$E_{SST} = \frac{SST_{entrada} - SST_{salida}}{SST_{entrada}} * 100$$

$$E_{DBO} = \frac{277,5 \frac{mg}{L} - 140,0 \frac{mg}{L}}{277,5 \frac{mg}{L}} * 100 = 49,5\%$$

A.3 Cálculo de la varianza y el promedio

- Cálculo del promedio de pH para el caudal de 1 L/min

$$Prom = \frac{M_{14} + M_{15} + M_{16} + M_{17}}{n}$$

$$Prom = \frac{6,97 + 8,20 + 8,22 + 8,33}{4} = 7,93$$

Donde:

- $Prom$: Promedio de los datos
- M_x : Muestreo contemplado para dicho caudal
- n : cantidad de muestreos a promediar

- Cálculo de la varianza para el pH del caudal de 1 L/min:

$$\sigma^2 = \frac{\sum (M_x - Prom)^2}{n}$$

$$\sigma^2 = \frac{(6,97 - 7,93)^2 + (8,20 - 7,93)^2 + (8,22 - 7,93)^2 + (8,33 - 7,93)^2}{4}$$

$$\sigma^2 = 0,31$$

Donde:

- σ^2 : Varianza
- M_x : Muestreo contemplado para dicho caudal
- n : cantidad de muestreos contemplados

B. Resultados de la investigación

Cuadro B.1 Valores obtenidos de pH en los muestreos

Potencial de hidrógeno							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	7,29	6,94	7,76	7,70	7,46	7,25
	2	7,91	7,29	7,67	7,89	7,84	7,64
	3	6,97	7,20	7,64	7,54	7,73	7,34
	4	9,03	7,30	7,05	6,93	7,08	6,76
	5	6,76	7,36	7,68	7,25	7,35	6,86
	6	6,97	7,17	7,65	7,84	7,87	7,65
4 L/min	7	6,27	7,31	7,51	7,80	7,87	7,71
	8	6,89	7,21	7,17	7,55	7,58	7,66
	9	6,93	7,28	7,21	7,63	7,63	7,65
3 L/min	10	5,66	7,04	7,31	7,63	7,70	8,26
	11	6,74	7,30	7,94	7,59	7,73	7,80
	12	7,28	6,84	7,38	7,26	7,10	7,36
	13	6,51	7,48	7,31	7,68	7,69	7,81
1 L/min	14	6,97	7,25	8,05	7,83	8,02	7,94
	15	8,20	7,03	7,69	7,22	7,26	7,25
	16	8,22	7,69	7,90	7,80	7,71	7,78
	17	8,33	7,64	7,79	7,88	7,98	8,03

Color rojo: valores por encima del límite superior del pH correspondiente a 9

Cuadro B.2 Valores obtenidos de conductividad en los muestreos

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	687,6	1045,0	957,5	1009,0	1015,0	921,3
	2	910,9	921,2	848,8	905,6	927,3	861,8
	3	864,0	705,3	805,3	717,3	691,7	671,1
	4	2389,0	753,2	894,3	735,4	734,8	728,1
	5	963,1	839,3	869,1	812,1	767,7	767,7
	6	504,8	1102,0	1004,0	1061,0	1076,0	1076,0
4 L/min	7	1227,0	898,4	890,9	848,7	873,2	882,4
	8	1052,0	649,0	729,3	610,5	637,4	614,4
	9	846,6	703,9	719,1	660,7	702,6	725,3
3 L/min	10	522,1	1090,0	1121,0	1026,0	1045,0	943,9
	11	891,9	1243,0	1190,0	1225,0	1210,0	1147,0
	12	647,1	1127,0	1125,0	1112,0	1110,0	1056,0
	13	836,4	819,1	967,8	1003,0	988,5	966,3
1 L/min	14	578,3	1201,0	1103,0	1192,0	1189,0	1121,0
	15	1699,0	1273,0	1121,0	1094,0	1001,0	950,8
	16	806,9	1087,0	1116,0	1094,0	1107,0	1019,0
	17	468,1	1045,0	1028,0	1022,0	1028,0	795,8

Color rojo: valores por encima del límite superior de conductividad correspondiente a 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Cuadro B.3 Valores obtenidos de sólidos disueltos totales en los muestreos

Sólidos disueltos totales (ppm)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	699,7	1164,0	1071,4	1023,0	1029,0	935,4
	2	927,4	1915,2	975,8	921,8	942,4	877,8
	3	879,5	915,4	916,4	728,6	704,7	681,3
	4	2435,0	967,3	915,8	749,2	753,0	743,4
	5	997,3	955,5	882,0	827,4	782,0	767,0
	6	512,7	1120,0	1019,0	1078,0	1094,0	1047,0
4 L/min	7	1248,0	1014,5	1005,4	862,6	862,6	886,1
	8	1076,0	959,7	941,9	624,7	624,7	647,7
	9	864,5	814,4	931,7	678,8	678,8	716,9
3 L/min	10	1030,2	1111,0	1144,0	1045,0	1063,0	959,0
	11	1006,4	1268,0	1220,0	1252,0	1231,0	1170,0
	12	1058,0	1149,0	1143,0	1130,0	1128,0	1074,0

Sólidos disueltos totales (ppm)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
	13	949,9	937,6	1089,9	1023,0	1006,0	1400,0
1 L/min	14	385,8	1218,0	1121,0	1212,0	1206,0	1140,0
	15	1734,0	1095,0	1036,0	1519,0	1016,0	964,3
	16	403,4	843,5	908,1	548,3	553,9	509,8
	17	234,4	722,4	914,0	511,1	514,3	398,0

Cuadro B.4 Valores obtenidos de oxígeno disuelto en los muestreos

Oxígeno disuelto (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	2,18	0,10	3,04	2,83	2,76	2,39
	2	0,10	0,01	1,63	2,17	1,80	1,85
	3	0,08	0,02	0,33	0,15	1,05	0,37
	4	0,96	0,04	1,99	0,64	1,64	0,84
	5	0,04	0,03	0,52	1,14	0,61	1,42
	6	0,91	0,04	0,56	2,22	2,31	2,21
4 L/min	7	2,27	0,04	0,71	0,60	0,32	1,43
	8	0,07	0,09	1,69	1,42	1,52	1,76
	9	0,33	0,03	1,69	1,16	1,10	1,63
3 L/min	10	0,10	0,03	0,06	0,12	0,07	0,06
	11	0,47	0,04	0,35	0,07	0,07	1,44
	12	0,12	0,09	0,07	0,03	0,15	0,60
	13	0,10	0,01	0,12	0,03	0,04	0,75
1 L/min	14	1,50	0,09	0,70	0,75	0,69	0,91
	15	1,06	0,09	1,04	1,27	1,27	1,79
	16	1,36	0,02	1,77	1,15	1,12	2,46
	17	1,34	0,09	1,28	1,04	1,20	1,32

Cuadro B.5 Valores obtenidos de nitrito en los muestreos

Nitrito (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	0,12	0,012	0,60	0,54	0,04	0,0001
	2	0,07	0,05	0,65	0,43	0,07	0,43
	3	0,14	0,02	0,04	0,03	0,71	0,13
	4	0,11	0,03	0,59	0,04	0,05	0,07
	5	0,16	0,08	0,05	0,77	0,11	0,014
	6	0,07	0,02	0,46	0,15	0,28	0,07
4 L/min	7	0,19	0,02	0,41	0,01	0,05	0,16
	8	0,09	0,02	0,73	0,07	0,02	0,07
	9	0,11	0,03	0,06	0,04	0,04	0,002
3 L/min	10	0,09	0,04	0,10	0,13	0,08	0,05
	11	0,08	0,05	0,07	0,02	0,06	0,05
	12	0,09	0,09	0,01	0,06	0,02	0,001
	13	0,12	0,09	0,05	0,07	0,06	0,25
1 L/min	14	0,11	0,04	0,01	0,03	0,01	0,001
	15	0,17	0,05	0,10	1,47	0,23	0,73
	16	0,08	0,08	0,76	0,06	0,08	0,06
	17	0,09	0,17	0,03	0,07	0,08	0,05

Color rojo: valores por encima de la mediana correspondiente a 0,07 mg/L

Cuadro B.6 Valores obtenidos de nitrato en los muestreos

Nitrato (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	8	2	14	10	6	2
	2	7	1	3	5	4	6
	3	4	2	2	4	5	3
	4	4	2	12	3	3	3
	5	8	4	4	6	5	4
	6	5	2	7	4	2	5
4 L/min	7	8	8	6	2	2	4
	8	6	2	9	3	2	3
	9	7	5	10	3	5	3
3 L/min	10	5	2	3	3	6	2
	11	3	5	8	5	4	3
	12	5	7	2	7	5	6
	13	6	3	2	4	2	5
1 L/min	14	8	5	7	4	2	2
	15	5	6	3	2	14	4
	16	4	4	7	6	5	2
	17	4	4	10	4	3	3

Cuadro B.7 Valores obtenidos de nitrógeno amoniacal en los muestreos

Nitrógeno amoniacal (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	1,6	6,6	1,7	1,3	1,6	0,95
	2	1,2	8,8	0,2	0,4	0,4	1,1
	3	2,8	4,6	0,4	1,6	0,6	0,8
	4	0,4	5	1,0	0,4	0,4	0,2
	5	2,4	4,8	0,8	0,6	1,0	0,2
	6	1,0	3,2	0,8	0,8	0,6	0,4
4 L/min	7	2,4	4,6	0,4	0,4	0,6	0,4
	8	2,2	3	0,2	0,6	0,6	0,4
	9	0,8	2,6	0,2	0,4	0,4	0,4
3 L/min	10	2,0	3,8	1,2	0,4	1,8	0,4
	11	2,0	3,4	1,2	1,2	1,0	0,6
	12	4,2	4,6	4,0	3	3,6	0,2
	13	3,6	4	3,4	1,2	2,0	2,0
1 L/min	14	22	33,2	21,2	20,8	20,8	20,2
	15	24,8	28	20,02	20,6	21,4	20,02
	16	30,2	41,6	31	21,8	24,8	21
	17	25,2	38,2	20,8	22,6	32,8	20,6

Color rojo: valores particularmente superiores comparados a los demás

Cuadro B.8 Valores obtenidos de fósforo en los muestreos

Fósforo (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	15,6	23,8	20,6	39,0	23,4	22,4
	2	30,6	21,8	18,5	18,6	21,0	26,3
	3	26,9	13,4	16,5	17,8	19,5	9,1
	4	16,7	16,1	20,3	28,4	18,1	7,2
	5	21,3	18,5	18,9	19,7	16,1	8,7
	6	9,8	18,7	19,1	23,4	20,0	24,0
4 L/min	7	18,4	19,5	14,8	21,3	20,2	7,4
	8	20,2	15,9	12,5	15,4	21	23,2
	9	17,2	21,3	15,8	20,3	15,3	22
3 L/min	10	10,1	22,8	27,3	27,1	32,6	24,5
	11	8,4	27,2	30,4	45,2	31,8	6,0
	12	14,8	23,0	32,8	35,2	30,4	21,0

Fósforo (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
	13	28,0	24,6	42,8	41,6	30,6	30,0
1 L/min	14	28,6	27,6	27,8	35,6	31,0	24,2
	15	34,8	29,8	27,4	14,2	29,4	18,6
	16	76,2	30,8	25,4	31,6	33,4	59,6
	17	13,6	25,8	35,0	46,0	36,8	35,8

Color rojo: valores superiores al rango de 6 – 20 mg/L

Color azul: valores dentro del rango de 6 – 20 mg/L

Cuadro B.9 Valores obtenidos de sólidos totales en los muestreos

Sólidos totales (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	3	990	190	280	270	390	280
	4	2550	470	610	340	400	390
	5	1050	430	450	500	380	430
	6	500	510	630	470	510	450
4 L/min	7	1350	390	580	380	430	440
	8	880	350	520	320	370	260
	9	1380	910	990	830	800	770
3 L/min	10	2710	2800	3560	3280	3610	2860
	11	360	330	320	240	250	590
	12	600	700	870	740	750	600
	13	1260	750	650	620	650	490
1 L/min	14	1410	900	1060	400	130	380
	15	1280	690	520	1240	770	440
	16	690	890	760	860	1140	680
	17	350	740	1090	640	570	430

Color rojo: valores particularmente superiores comparados a los demás

Cuadro B.10 Valores obtenidos de sólidos suspendidos totales en los muestreos

Sólidos suspendidos totales (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	3	210	90	20	80	10	10
	4	40	200	600	10	150	120
	5	20	40	30	90	70	40
	6	180	50	80	10	90	10

Sólidos suspendidos totales (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
4 L/min	7	430	250	60	160	50	20
	8	90	180	220	20	130	160
	9	1230	90	110	160	240	70
3 L/min	10	1640	1970	2720	2620	2980	2270
	11	250	230	160	230	50	570
	12	180	190	360	270	180	20
	13	360	30	30	150	170	330
1 L/min	14	1200	670	860	180	80	270
	15	270	280	10	180	260	100
	16	160	110	100	150	390	30
	17	80	50	470	50	200	410

Color rojo: valores por encima del límite superior de SST correspondiente a 50 mg/L

Cuadro B.11 Valores obtenidos de sólidos volátiles en los muestreos

Sólidos volátiles (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	120	160	160	280	200	440
	2	80	40	80	400	160	360
	3	40	400	120	80	80	280
	4	1800	80	120	160	40	400
	5	400	80	240	200	240	240
	6	2520	400	320	160	280	200
4 L/min	7	480	360	400	400	160	280
	8	400	160	80	40	160	160
	9	240	120	40	200	120	520
3 L/min	10	1440	1880	2080	1640	1120	1240
	11	80	400	360	120	80	160
	12	320	560	720	240	480	280
	13	240	880	680	440	400	80
1 L/min	14	440	80	35	40	45	40
	15	400	320	400	240	360	120
	16	200	120	40	560	40	160
	17	40	80	80	80	120	400

Color rojo: valores particularmente superiores comparados a los demás

Cuadro B.12 Valores obtenidos de DQO en los muestreos

Demanda química de oxígeno (mg/L)							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	1019	446	329	397	220	145
	2	739	321	185	147	198	148
	3	953	249	143	99	121	82
	4	560	265	158	199	191	136
	5	711	380	283	202	187	185
4 L/min	6	1870	325	254	171	204	138
	7	1440	240	102	178	231	119
	8	767	344	309	155	193	127
3 L/min	9	1550	414	645	239	328	260
	10	1270	400	650	590	376	130
	11	1330	470	680	570	360	240
	12	931	820	299	201	303	178
1 L/min	13	1200	409	279	291	233	107
	14	947	377	331	498	318	110
	15	512	681	385	319	405	169
	16	348	380	239	254	240	195

Color rojo: valores por encima del límite superior de DQO correspondiente a 150 mg/L

Cuadro B.13 Valores obtenidos de DBO en los muestreos

Demanda bioquímica de oxígeno							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keysha Izq	Keysha Der	Salida PTAR
2 L/min	1	418	79	47	53	23	11
	2	264	72	55	13	19	8
	3	260	57	35	12	35	12
	4	204	31	36	22	31	13
4 L/min	6	123	28	29	86	110	15
	7	159	53	31	84	93	16
	8	189	40	42	75	95	12
3 L/min	9	189	45	90	95	141	18
	10	144	54	84	57	59	48
	12	131	79	78	83	51	117
1 L/min	13	129	147	129,13	33	40	14
	14	162	58	40	123	163	124
	15	127	77	148	115	117	31

Color rojo: valores por encima del límite superior de DBO correspondiente a 50 mg/L

Cuadro B.14 Valores obtenidos de la relación DBO/DQO en todos los muestreos

Relación DBO/DQO							
Caudal en el Keisya	Muestreo	Entrada PTAR	UASB	Filtro percolador	Keisya 1	Keisya 2	Salida PTAR
2 L/min	1	0,410	0,177	0,143	0,134	0,105	0,076
	2	0,357	0,224	0,297	0,088	0,096	0,054
	3	0,272	0,229	0,245	0,121	0,289	0,146
	4	0,364	0,117	0,228	0,111	0,162	0,096
4 L/min	6	0,066	0,086	0,114	0,503	0,539	0,109
	7	0,110	0,221	0,304	0,472	0,403	0,134
	8	0,246	0,116	0,136	0,484	0,492	0,094
3 L/min	9	0,122	0,109	0,140	0,397	0,430	0,069
	10	0,113	0,135	0,129	0,097	0,157	0,369
	12	0,141	0,096	0,261	0,413	0,168	0,657
1 L/min	13	0,108	0,359	0,463	0,113	0,172	0,131
	14	0,171	0,154	0,121	0,247	0,513	1,127
	15	0,248	0,113	0,384	0,361	0,289	0,183

Color verde: valores muy biodegradables

Color azul: valores poco biodegradables

C. Pruebas de laboratorio

C. 1 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno fue medida utilizando un digestor de marca HACH, que se puede observar en la Figura 148 el cual se ajusta a una temperatura de 150°C para la colocación de los viales.

Los viales utilizados en la mayoría de pruebas fueron de alto rango (20-1500 mg/L) y durante 3 semanas correspondientes al caudal de estudio de 3 L/min se utilizaron viales de bajo rango (0 100 mg/L) con dilución de la prueba debido a que eran los únicos viales disponibles en el laboratorio.

Por semana se utilizaron siete viales, correspondientes a las seis muestras de agua y al blanco, este último corresponde a 2 mL de agua destilada que luego servirá de referencia con los otros viales que contienen la muestra de agua correspondiente.

Luego de introducir 2 mL de agua residual en cada vial, y con el digestor en una temperatura constante de 150°C se colocan los viales por 120 min. Al terminar el

tiempo, se espera que los viales bajen la temperatura para utilizar el colorímetro y obtener el resultado de la prueba. El colorímetro utilizado para todas las pruebas corresponde al modelo DR 900 de la marca HACH (Figura 150).

El método de desarrollo de la prueba de DQO cumple con el "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater" siendo compatible con el "5220D método colorímetro".



Figura 148. Digestor de DQO

C.2 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Los métodos utilizados para determinar la Demanda Bioquímica de Oxígeno cumplen con la norma internacional "5210B Método respirométrico" del documento "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater".

Se utilizan dos equipos para determinar la DBO, uno de ellos corresponde al BODTrak HACH (Figura 151) y el otro es VELD Scientifica (Figura 152). En ambos se introducía la cantidad de agua residual adecuada junto con un agitador y un tapón con tres pastillas de Hidróxido de Sodio (Figura 153).

Con el equipo HACH los datos se obtenían de forma manual por medio de los gráficos dados en la pantalla frontal. Por otro lado, el equipo VELD Scientifica se programó para que realizara la medición cada seis horas y los resultados se proporcionan mediante un documento de Excel con todas las mediciones.

En ambos casos, los equipos fueron introducidos en una incubadora (Figura 154) para lograr que las muestras estuvieran en temperatura constante de 20°C durante los 5 días de medición.



Figura 151. Equipo de medición de DBO



Figura 152. Equipo de medición de DBO VELP Scientifica

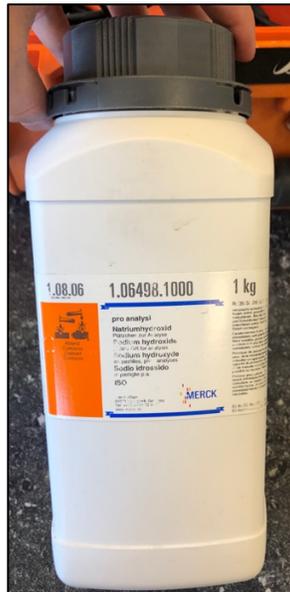


Figura 153. Hidróxido de sodio



Figura 154. Incubadora ambiental EQUATHERM

C.3 Sólidos Totales y Sólidos Suspendidos Totales

El método utilizado para determinar los sólidos totales cumple con el método 2540B y el método para determinar los sólidos suspendidos totales es compatible con el método 2540D del "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater".

Para determinar los sólidos se toman 100 mL de muestra que son introducidos en una cápsula de porcelana al horno con una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$. En el caso de los sólidos suspendidos totales se toma una muestra que previamente ha sido pasada por un filtro.

Las muestras se mantienen dentro del horno por un periodo de 24 horas, pero debido a la emergencia sanitaria por la COVID-19 la disponibilidad del laboratorio durante los ensayos era de dos días a la semana, por lo que fue necesario que las

pruebas estuvieran 48 horas en el horno para luego medirse su masa en la balanza de precisión.

El horno utilizado es de la marca EQUATHERM (Figura 155) y la balanza de la marca ADAM (Figura 156). Además, los filtros utilizados son de la marca Sartorius de grado 292 con un diámetro nominal de poro de 125 mm (Figura 157).



Figura 155. Horno de marca EQUATHERM



Figura 156. Balanza de precisión de marca ADAM

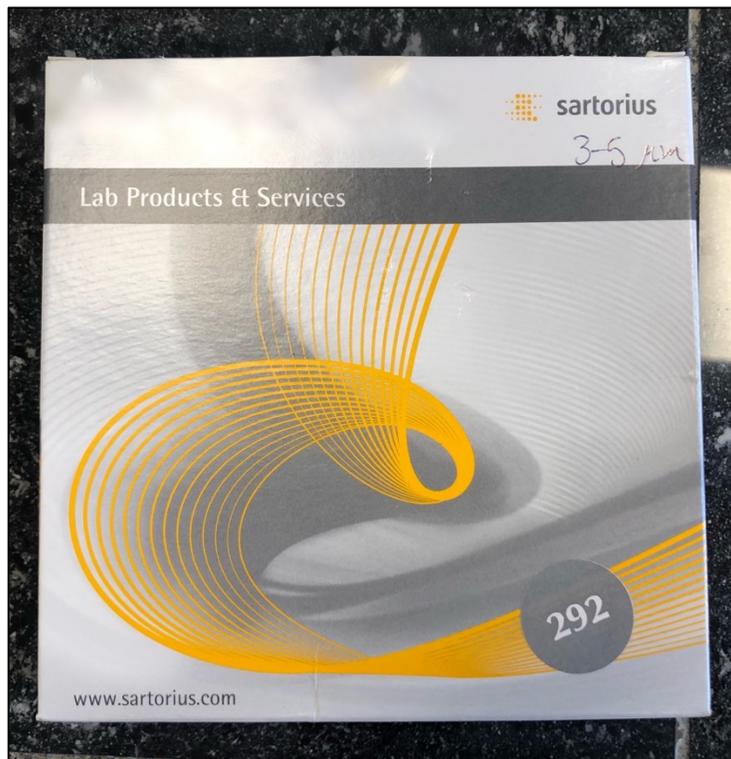


Figura 157. Filtro de papel Sartorius

C.4 Sólidos Volátiles

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

Primero, se toma una muestra de 25 mL de aguas residuales que es colocada en un crisol de porcelana (previamente con su masa medida) para posteriormente introducirse a una mufla (Figura 158) la cual se mantiene a una temperatura de 550°C durante dos horas. Después se procede a medir la masa de los crisoles de porcelana en la balanza de precisión (Figura 156), y la diferencia en las medidas corresponde a los sólidos fijos, necesarios para la obtención de los sólidos volátiles.



Figura 158. Mufla de la marca Analytical

C.5 Nitrito

La concentración de nitrito en las muestras es obtenido mediante el método de análisis HACH method 8507, en el cual se utilizan muestras de 10 mL en las cuales se introduce el reactivo NitriVer3 (Figura 159) por un periodo de diez minutos y con ayuda del colorímetro HACH DR 900 (Figura 150) se conoce la concentración de nitrito de la muestra.

En algunas ocasiones fue necesario realizar una dilución de la muestra de agua residual con agua destilada ya que la concentración de nitrito era tan elevada que se salía del rango dado por el colorímetro. El valor obtenido se multiplica por el factor de dilución para de esta forma obtener el valor real de la concentración nutrientes.

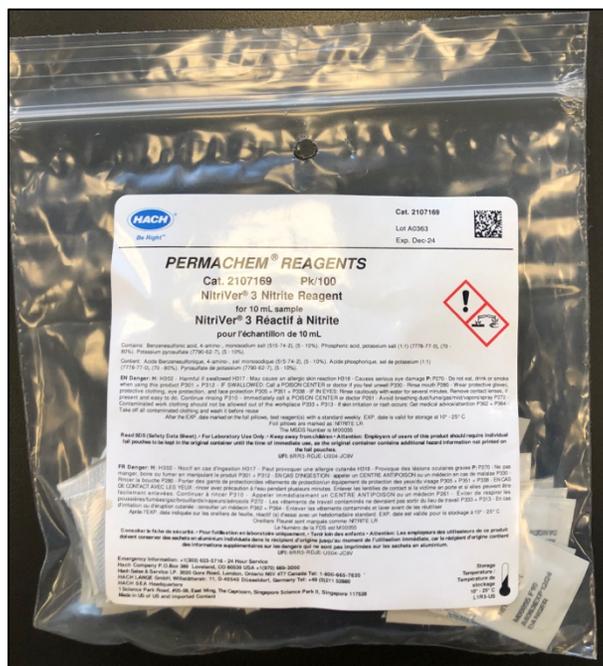


Figura 159. Reactivo al nitrito denominado Nitriver3

C.6 Nitrato

La concentración de nitrato en las aguas residuales se obtiene mediante el método HACH Method 8171, en el que se realiza la adición de reactivo a nitrato NitraVer5 en una muestra de 10 mL durante un periodo de cinco minutos, luego se procede a medir la concentración de nitrato en la muestra con un colorímetro HACH DR 900. Al igual que el nitrito, en los casos en que el colorímetro no medía la concentración de nitrato fue necesario realizar una dilución con agua destilada, obteniendo un valor que se multiplica por el factor de dilución empleado.



Figura 160. Reactivo al nitrato NitraVer5

C.7 Nitrógeno amoniacal

Para la obtención de la concentración de nitrógeno amoniacal se utiliza el procedimiento de HACH Method 8038 el cual es compatible con el método 4500-NH3 de "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater".

Se toma una muestra de 25 mL y se le añade 3 gotas de estabilizador mineral, 3 gotas de alcohol de polivinilo y 1 mL de reactivo Nessler como se muestra en la Figura 161, luego se mezcla y se utiliza el colorímetro HACH DR900 para determinar la concentración de nitrógeno amoniacal.

En los casos en que la muestra se salía del rango del colorímetro, se procedía a realizar una dilución de esta con agua destilada, para al final multiplicar el valor obtenido por el factor de dilución.



Figura 161. Estabilizador mineral, alcohol de polivinilo y Nessler

C.8 Fósforo

La concentración de fósforo en las muestras de aguas residuales es medida aplicando el método HACH Method 8048 que es compatible con el método 4500P D del "Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater".

En una muestra de 10 mL se introduce el reactivo PhosVer3 (Figura 162), se mezcla y se espera durante un periodo de 2 minutos con el fin de ser medido en el colorímetro HACH DR900 (Figura 150). Al igual que en los casos anteriores, si la muestra contiene nutrientes por encima de lo posible que puede medir el colorímetro, se realiza una dilución.

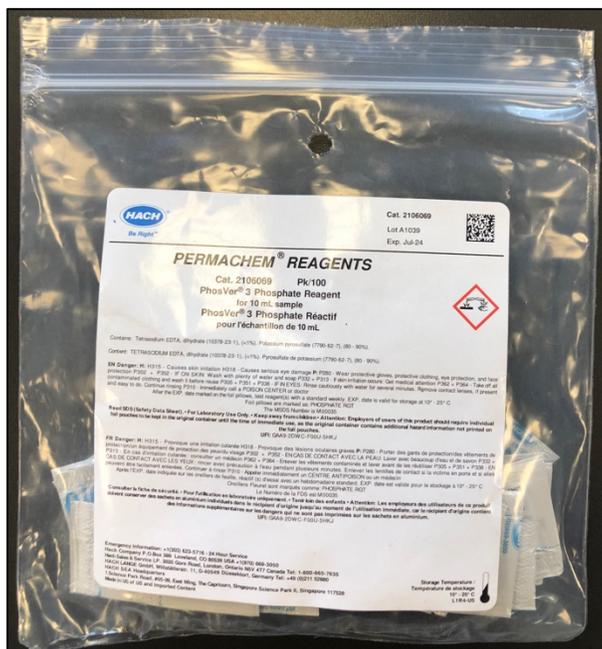


Figura 162. Reactivo al fósforo PhosVer3

C.9 Parámetros de control

Dentro de los parámetros de control ensayados en el laboratorio están: pH, temperatura, sólidos disueltos totales, conductividad y oxígeno disuelto. Los cuatro primeros parámetros se analizaron con el multiparámetros que se observa en la Figura 163 en el cual se tenía la muestra y se introducían los elementos con sumo cuidado para realizar la medición.

En el caso de la temperatura, los valores obtenidos eran de la temperatura después de la refrigeración, esto debido a que por la pandemia de la COVID-19 se realizaron las pruebas de laboratorio con la disponibilidad que este tuviera según los permisos de la Escuela de Ingeniería Civil.



Figura 163. Multiparámetros marca HANNA Instruments

En el caso del oxígeno disuelto se utiliza el equipo mostrado en la Figura 164 de la marca OAKTON modelo DO 2700, en el cual el procedimiento consistía en introducir el agitador en un recipiente con la muestra de aguas residuales y se tomaba la medición dada por el equipo.



Figura 164. Medidor de oxígeno disuelto de mesa marca OAKTON DO 2700

D. Información relevante

D.1 Proyectos anteriores

Cuadro D.1.1 Eficiencias experimentales del Keisya en drenajes de cocina en Japón

Parámetro	Temporada de verano	Temporada de invierno	Total
	% de remoción	% de remoción	% de remoción
BOD	79 ± 28	79 ± 14	83 ± 13
COD	81 ± 33	81 ± 12	80 ± 16
T-N	76 ± 27	76 ± 15	73 ± 16
T-P	79 ± 18	79 ± 18	81 ± 14
SS	68 ± 11	68 ± 23	74 ± 17

Fuente: Miyake, 2020.

Cuadro D.1.2 Eficiencias experimentales del filtro percolador de la PTAR Santa Cecilia, Puriscal

Parámetro	Eficiencia esperada	Eficiencia teórica	Eficiencia experimental
DQO	60-80%	56,60%	20,10%
DBO	65-80%	76,90%	4,70%

Fuente: Chacón, 2019.