

CONTRATO NO. 667 DE 2019

Elaborar un estudio que contenga el análisis y documente las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales, agrícola y aguas lluvias, y realice recomendaciones para la implementación y reglamentación del reúso de agua residual en Colombia

Informe consolidado de resultados

**CONSORCIO NYV CALTIZ
Aguas residuales**

Mayo de 2020

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. ENFOQUE METODOLÓGICO | 12 |
| 2.1. Objetivos | 12 |
| 2.1.1. Objetivo general | 12 |
| 2.1.2. Objetivos específicos..... | 12 |
| 2.2. Enfoque..... | 12 |
| 2.3. Aproximación conceptual y metodológica | 16 |
| 2.3.1. Aproximación técnica y metodológica | 16 |
| 2.3.2. Análisis Contextualización Internacional reúso de agua residual | 17 |
| 2.3.3. Análisis de técnicas de reúso implementables en Colombia | 20 |
| 2.3.4. Contextualización y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia..... | 21 |
| 3. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES SOBRE REÚSO DE AGUAS RESIDUALES | 24 |
| 3.1. Antecedentes | 24 |
| 3.2. Experiencias internacionales | 35 |
| 3.2.1. Experiencias países Latinoamericanos | 35 |
| 3.2.2. Experiencias países fuera de Latinoamérica | 142 |
| 3.3. Conclusiones generales..... | 183 |
| 4. TÉCNICAS DE REÚSO IMPLEMENTABLES EN COLOMBIA..... | 187 |
| 4.1. Técnicas de tratamiento para el reúso..... | 187 |
| 4.1.1. Reúso agrícola..... | 187 |
| 4.1.2. Reúso domestico..... | 226 |
| 4.1.3. Reúso industrial | 249 |
| 4.1.4. Uso de aguas lluvias..... | 269 |
| 4.2. Análisis costo beneficio | 291 |
| 4.2.1. Supuestos e información empleada para el análisis..... | 294 |
| 4.2.2. Generalidades de las regiones..... | 296 |
| 4.2.3. Pasos para realizar el análisis costo beneficio del reúso del agua residual tratada | 303 |
| 4.2.4. Análisis costo beneficio por región..... | 309 |
| 4.3. Conclusiones | 319 |
| 5. CONTEXTUALIZACIÓN DEL REÚSO DE AGUA EN COLOMBIA | 325 |
| 5.1. Aspectos analizados | 325 |
| 5.1.1. Aspectos económicos e institucionales..... | 325 |
| 5.1.2. Aspectos sociales..... | 335 |

| | |
|---|------------|
| 5.1.3. Aspectos técnicos y ambientales | 336 |
| 5.1.4. Aspectos legales | 338 |
| 5.2. Casos exitosos de reúso en Colombia | 345 |
| 5.2.1. Reúso Agrícola | 345 |
| 5.2.2. Reúso Industrial | 365 |
| 5.2.3. Reúso Doméstico | 374 |
| 5.3. Recomendaciones para la implementación del reúso de agua en Colombia..... | 375 |
| 5.3.1. Recomendaciones técnicas..... | 375 |
| 5.3.2. Recomendaciones normativas..... | 381 |
| 5.3.3. Recomendaciones institucionales..... | 390 |
| 5.3.4. Otras recomendaciones..... | 393 |
| 6. CONCLUSIONES | 396 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA..... | 400 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Objetivos de los productos | 16 |
| Tabla 2. Ranking de países que reutilizan aguas residuales | 26 |
| Tabla 3. Disponibilidad y usos de agua en México..... | 37 |
| Tabla 4. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales..... | 38 |
| Tabla 5. Criterios de Calidad de agua para irrigación en EEUU, México e Israel | 40 |
| Tabla 6. Etapas del Proceso de la PTAR | 51 |
| Tabla 7. Calidad del agua influente, efluente y % de remoción | 53 |
| Tabla 8. Características del agua residual cruda a ser tratada | 53 |
| Tabla 9. Concentración De Metales Pesados Y Cianuro en el Agua Residual a ser tratada En La Ptar Atotonilco..... | 54 |
| Tabla 10. Los límites máximos permisibles en el efluente tratado para el TPC | 54 |
| Tabla 11. Los límites máximos permisibles en el efluente tratado para el TPC | 55 |
| Tabla 12. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales | 57 |
| Tabla 13. Matriz normativa de las principales leyes de México en materia de reúso de agua..... | 66 |
| Tabla 14. Disponibilidad y usos de agua en Chile | 71 |
| Tabla 15. Comparación de normatividad internacional y nacional para componentes y parámetros presentes en aguas residuales para reúso agrícola .. | 75 |
| Tabla 16. Análisis económico de ganancias | 77 |
| Tabla 17. Caudales Instantáneos Máximos de Crecidas [m ³ /s] Sectores de Interés | 90 |
| Tabla 18. Resumen de costos de la construcción de obras cosecha de aguas Lluvias – Valores Totales (IVA Incluido) | 94 |
| Tabla 19. Procesos PTAR Aguas Chañar | 97 |
| Tabla 20. Matriz normativa de las principales leyes de Chile | 104 |
| Tabla 21. Disponibilidad y usos de agua en Perú..... | 109 |
| Tabla 22. Reúso de las aguas residuales tratadas | 111 |
| Tabla 23. Balance hídrico de la cuenca Caplina (m ³ /s) | 123 |
| Tabla 24. Zona Agrícola de la Provincia de Tacna – Extensión en 2016..... | 124 |
| Tabla 25. Características del efluente de la nueva PTAR Tacna en Magollo como queda estipulado en las actas de compromiso de 2018..... | 128 |
| Tabla 26. Plan de distribución inicial del efluente de la nueva PTAR Tacna..... | 128 |
| Tabla 27. Marco Institucional de Perú..... | 135 |
| Tabla 28. Matriz normativa de las principales leyes de Perú | 138 |
| Tabla 29. Calidad del agua residual a tratar..... | 146 |
| Tabla 30. Estándar Sudafricano para agua potable Clase 0 SANS 024 | 147 |
| Tabla 31. Matriz normativa para Sudáfrica | 159 |
| Tabla 32. Calidad del agua después del tratamiento de suelo acuífero (SAT) en Shafdan | 167 |
| Tabla 33. Costo de agua | 173 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 34. Matriz normativa de las principales leyes de Israel | 179 |
| Tabla 35. Requisitos para regular la calidad del efluente de las aguas tratadas | 179 |
| Tabla 36. Criterios de calidad de agua para reúso agrícola en diferentes regiones | 189 |
| Tabla 37. Guías sugeridas por la FAO para las aguas tratadas en el reúso agrícola y su tratamiento | 190 |
| Tabla 38. Guía para la interpretación de agua de Riego | 190 |
| Tabla 39. Concentraciones máximas de elementos trazas en aguas de riego. | 191 |
| Tabla 40. Resultados lagunas de estabilización | 193 |
| Tabla 41. Población por departamento región Caribe | 297 |
| Tabla 42. Población por departamento región Andina | 300 |
| Tabla 43. Población por departamento región Amazónica | 301 |
| Tabla 44. Población por departamento región Orinoquía..... | 302 |
| Tabla 45. Población por departamento región Pacífica | 303 |
| Tabla 46. Distribución (%) la demanda hídrica sectorial por Región | 304 |
| Tabla 47. Distribución de la demanda hídrica (m ³) sectorial por Región | 305 |
| Tabla 48. Valor del agua potable empleada por uso y por Región | 305 |
| Tabla 49. Oferta y demanda del agua empleada para el Reúso por Región | 306 |
| Tabla 50. Valor de la operación del sistema de tratamiento por región y tecnología | 308 |
| Tabla 51. Valor del metro cúbico de agua empleada para Reúso por región | 309 |
| Tabla 52. Balance hídrico por región | 315 |
| Tabla 53. Costo del uso del agua para las actividades industrial y agrícola sin reúso de agua..... | 315 |
| Tabla 54. Costo del uso del agua para las actividades industrial y agrícola empleando reúso de agua residual tratada..... | 316 |
| Tabla 55. Costos evitados por reúso de agua en el sector industrial..... | 317 |
| Tabla 56. Costos evitados por reúso de agua en el sector Agrícola | 317 |
| Tabla 57. Costos evitados totales por reúso de agua residual tratada..... | 317 |
| Tabla 58. Porcentaje de ahorro de agua por la actividad de reúso..... | 319 |
| Tabla 59. Meta del ODS 6.3. sobre tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia..... | 333 |
| Tabla 60. Distinción normativa entre reúso y recirculación | 343 |
| Tabla 61. Resultado características del agua de producción tratada - Salida Barcazas – ASA - Campo de Producción Castilla. Ecopetrol S.A. diciembre de 2019. | 348 |
| Tabla 62. Calidad del agua de producción tratada y del agua de pozo profundo utilizadas en los experimentos..... | 350 |
| Tabla 63. Calidad del efluente tratado y comparación normas de reúso..... | 357 |
| Tabla 64. Experiencias nacionales relacionadas con la aplicación de aguas residuales tratadas en agricultura | 359 |
| Tabla 65. Caracterización agua residual tratada para vertimiento al Rio Bogotá | 368 |

Tabla 66. Condiciones Calidad de agua residual tratada con tratamiento avanzado para recirculación en procesos productivos autorizados.....370

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| Gráfico 1. Escorrentía media anual Cuencas hidrográficas | 14 |
| Gráfico 2. Actores preliminares Reúso de Agua | 23 |
| Gráfico 3. Mapa de México | 36 |
| Gráfico 4. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales . | 39 |
| Gráfico 5. Localización Valle de Hermosillo - Sonora, México | 42 |
| Gráfico 6. Diagrama PTAR Hermosillo - Sonora | 46 |
| Gráfico 7. Localización Valle del Mezquital Hidalgo, México..... | 48 |
| Gráfico 8. Diagrama de Flujo para descripción de tratamiento de las aguas residuales..... | 52 |
| Gráfico 9. PTAR Lerdo - Durango | 58 |
| Gráfico 10. PTAR Cd. Madero - Tamaulipas..... | 60 |
| Gráfico 11. Estructura Orgánica de CONAGUA | 62 |
| Gráfico 12. Principales instituciones coordinadas con CONAGUA..... | 62 |
| Gráfico 13. Mapa de Chile..... | 70 |
| Gráfico 14. Registro Fotográfico PTAR Cerrillos de Tamaya | 75 |
| Gráfico 15. Labor de subsolado Centro Experimental Hidango, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)..... | 81 |
| Gráfico 16. Aguadas Superficiales - Comunas de Navidad y Litueche Región de O`Higgins..... | 82 |
| Gráfico 17. Sistema captación en techos, conducción y filtro de polietileno..... | 83 |
| Gráfico 18. Cisterna flexible de 10.000 litros con techo protector - Comuna de Litueche, Región de O`Higgins y Comuna de Natales, Región de Magallanes y la Antártica chilena | 83 |
| Gráfico 19. Cisternas concreto y ferrocemento - Comuna de Pichilemu. | 83 |
| Gráfico 20. Estructura atrapanieblas con malla Raschel – 40 m2 de superficie – comunas La aguada y Navidad – Región de O'Higgins. Región de O´Higgins. | 85 |
| Gráfico 21. Canaleta de 10 m de largo bajo malla Raschel para captación de agua neblina o lluvia - Comuna de Litueche, Región de O 'Higgins..... | 85 |
| Gráfico 22. Sector Peña Blanca..... | 92 |
| Gráfico 23. Sector microcuenca la Moralina | 92 |
| Gráfico 24. Microcuenca Los Rulos..... | 92 |
| Gráfico 25. Mapa de Perú..... | 108 |
| Gráfico 26. El reúso de las aguas residuales tratadas | 110 |
| Gráfico 27. Proyecto PTAR La Enlozada | 114 |
| Gráfico 28. Sistema de colección y tratamiento de Aguas residuales PTAR La Enlozada..... | 115 |
| Gráfico 29. Ciclo de descarga Cero | 117 |
| Gráfico 30. Ubicación PTAR Santa Clara y canal de conducción | 119 |
| Gráfico 31. Panorámica PTAR Santa Clara..... | 120 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico 32. Ubicación Tacna | 123 |
| Gráfico 33. Concejo de Recursos Hídricos..... | 130 |
| Gráfico 34. Mapa de Sudáfrica..... | 142 |
| Gráfico 35. Esquema general del proceso y usos del agua tratada..... | 149 |
| Gráfico 36. Esquema detallado de la PTAR..... | 150 |
| Gráfico 37. Asociación Público – Privada (PPP). Actores y empresas involucradas | 152 |
| Gráfico 38. Partes involucradas en el proceso..... | 154 |
| Gráfico 39. Vista superior de la planta de tratamiento de agua residual. | 155 |
| Gráfico 40. Mapa de Israel..... | 162 |
| Gráfico 41. Proyectos desarrollados por Israel | 165 |
| Gráfico 42. Total, aguas residuales generadas, tratadas y reusadas en Israel | 166 |
| Gráfico 43. Registro fotográfico planta de tratamiento de agua residual de Shafdan | 167 |
| Gráfico 44. Tratamiento de aguas residuales en la Planta de Shafdan..... | 169 |
| Gráfico 45. Esquema del sistema de tratamiento SAT. | 170 |
| Gráfico 46. Esquema general de la planta de tratamiento en Haifa. | 173 |
| Gráfico 47. Participantes del sistema de tratamiento de aguas residuales en Shafdan | 174 |
| Gráfico 48. Reja de malla gruesa y tamiz fino..... | 196 |
| Gráfico 49. Desarenadores..... | 197 |
| Gráfico 50. Desengrasado aguas residuales domésticas y sistema combinado desarenado/desengrasado..... | 198 |
| Gráfico 51. Lagunas anaerobias. Facultativa y maduración- PTAR El Salguero-Valledupar | 199 |
| Gráfico 52. Esquema de funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales para reúso en agricultura..... | 202 |
| Gráfico 53. Estimación de Inversión en pesos colombianos de 2017 para laguna anaerobia más laguna facultativa más laguna de maduración | 204 |
| Gráfico 54. Estimación de costos de operación y mantenimiento en pesos colombianos de 2017 para laguna anaerobia más laguna facultativa más laguna de maduración | 205 |
| Gráfico 55. Esquema de un decantador circular con puente | 208 |
| Gráfico 56. Curva de crecimiento bacteriano típico | 210 |
| Gráfico 57. Esquema del sistema de lodos activados | 210 |
| Gráfico 58. Sistema SBR..... | 212 |
| Gráfico 59. Tanque de cloración de aguas residuales..... | 214 |
| Gráfico 60. Deshidratadores mecánicos de lodos | 220 |
| Gráfico 61. Lechos de secado..... | 221 |
| Gráfico 62. Costos de inversión en pesos colombianos de 2017 en función de la población mediante tratamiento con lodos activados | 225 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 63. Costos de operación y mantenimiento en pesos colombianos de 2017 – Lodos activados en función de la población | 226 |
| Gráfico 64. PTAR tratamiento fases separadas de carbono y nitrificación- Marlborough, Mass | 230 |
| Gráfico 65. Esquemas eliminación Nitrógeno..... | 231 |
| Gráfico 66. Filtro de disco RoDisc®..... | 232 |
| Gráfico 67. Sistemas de tratamiento avanzado Microfiltración – Osmosis inversa | 236 |
| Gráfico 68. Sistema desinfección UV | 236 |
| Gráfico 69. Esquema funcionamiento SBR..... | 240 |
| Gráfico 70. Tipo de membrana según su configuración | 242 |
| Gráfico 71. sistema SBR instalado por AEMA en España | 244 |
| Gráfico 72. Costos de inversión en dólares para tratamiento avanzado con base en osmosis inversa..... | 248 |
| Gráfico 73. Costos de O&M en dólares para tratamiento avanzado con base en osmosis inversa..... | 248 |
| Gráfico 74. Tamices de malla fina..... | 251 |
| Gráfico 75. Reactor de metanización | 253 |
| Gráfico 76. Diagrama de bloques – tratamiento terciario y avanzado reúso en cervecería..... | 255 |
| Gráfico 77. Filtro autolimpiante..... | 256 |
| Gráfico 78. Sistema Ultrafiltración - UF | 256 |
| Gráfico 79. Filtro Carbón Activado | 257 |
| Gráfico 80. Suavizadores | 258 |
| Gráfico 81. Filtros de cartucho | 259 |
| Gráfico 82. Sistemas de filtración..... | 259 |
| Gráfico 83. Equipo de ósmosis Inversa..... | 260 |
| Gráfico 84. Esquema Preliminar- Primario..... | 263 |
| Gráfico 85. Componentes del Sistema de captación de aguas lluvia | 273 |
| Gráfico 86. Áreas de captación para tres tipos diferentes de techos | 274 |
| Gráfico 87. Sistemas de conducción de aguas lluvia | 275 |
| Gráfico 88. Sistema de conducción de primeras aguas | 276 |
| Gráfico 89. Tipos de tanques de almacenamiento..... | 278 |
| Gráfico 90. Desinfección por ozono | 281 |
| Gráfico 91. Desinfección Ultravioleta | 282 |
| Gráfico 92. Sistema de desinfección | 283 |
| Gráfico 93. Sistema distribución aguas lluvia..... | 283 |
| Gráfico 94. Sistema de captación con superficie | 287 |
| Gráfico 95. Sistema de captación de atrapanieblas | 288 |
| Gráfico 96. Esquema general de un sistema atrapanieblas..... | 289 |
| Gráfico 97. Mapa de la Región Caribe | 297 |
| Gráfico 98. Mapa de la Región Andina | 300 |
| Gráfico 99. Mapa de la Región Amazónica..... | 301 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 100. Mapa de la Región Orinoquía | 302 |
| Gráfico 101. Mapa de la Región Pacífica..... | 303 |
| Gráfico 102. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Caribe..... | 310 |
| Gráfico 103. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Andina..... | 310 |
| Gráfico 104. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Amazónica | 311 |
| Gráfico 105. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Orinoquía..... | 311 |
| Gráfico 106. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Pacífica ... | 312 |
| Gráfico 107. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Caribe..... | 312 |
| Gráfico 108. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Andina | 313 |
| Gráfico 109. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Amazónica | 313 |
| Gráfico 110. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Orinoquía | 314 |
| Gráfico 111. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Pacífica | 314 |
| Gráfico 112. Entidades del Gobierno Nacional involucradas con políticas de agua, saneamiento y temas ambientales..... | 327 |
| Gráfico 113. Demanda de agua por tipo de uso en Colombia | 332 |
| Gráfico 114. Esquemas tratamiento de aguas de producción para reúso – Ecopetrol | 347 |
| Gráfico 115. Localización de la PTAR dentro del municipio del Cerrito | 353 |
| Gráfico 116. Panorámica PTAR El Cerrito | 354 |
| Gráfico 117. Panorámica PTAR El Cerrito | 354 |
| Gráfico 118. Unidades Pretratamiento PTAR el Cerrito | 355 |
| Gráfico 119. Unidades de tratamiento secundario- lagunas anaerobias de alta Tasa | 355 |
| Gráfico 120. Lagunas facultativas – lechos de secado- biofiltro - tea | 356 |
| Gráfico 121. Tubería de conducción del efluente tratado al Río Sabaletas..... | 356 |
| Gráfico 122. Tratamiento de aguas residuales- Bavaria Tocancipá..... | 366 |
| Gráfico 123. Ubicación geográfica Bavaria – Cemex Tocancipá..... | 371 |
| Gráfico 124. Demanda potencial de agroquímicos en el sector agrícola | 380 |
| Gráfico 125. Composición institucional reúso agua | 392 |
| Gráfico 126. Fuentes de financiación o cofinanciación sector agua y saneamiento | 393 |

1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la situación de escasez de agua que enfrentan algunas regiones del país, en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 “*Pacto por Colombia, pacto por la equidad*” específicamente en el Pacto VIII. Pacto por la calidad y eficiencia de servicios públicos: agua y energía para promover la competitividad y el bienestar de todos; en el marco del enfoque de economía circular se incluyen las estrategias para incrementar el aprovechamiento de las aguas residuales mediante alternativas de reúso.

En este sentido, el Departamento Nacional de Planeación por medio del Concurso de Méritos No. 15 de 2019, abrió el proceso de licitación pública que fue adjudicado al Consorcio N&V – CALTIZ Aguas residuales, a través del Contrato de Consultoría No. 667 de 2019, cuyo objeto es “Elaborar un estudio que contenga el análisis y documente las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales, agrícola y aguas lluvias, y realice recomendaciones para la implementación y reglamentación del reúso de agua residual en Colombia”, el cual contempla el desarrollo de cuatro (4) actividades: I: Enfoque metodológico para el desarrollo del estudio, II: Revisión de experiencias internacionales sobre reúso de aguas residuales, III: Revisión de experiencias en Colombia, propuesta de técnicas de reúso doméstico, industrial, drenaje agrícola y uso de agua lluvia implementables en Colombia, y IV: Contexto y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia.

El objetivo de esta consultoría es elaborar un estudio que analice y documente las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias, y realizar recomendaciones para la implementación y reglamentación del reúso de agua residual en Colombia.

El presente documento corresponde al consolidado de los resultados de la consultoría. Se encuentra dividido en 7 capítulos, el primer capítulo presenta la introducción, el segundo capítulo es el enfoque metodológico del proyecto. El tercer capítulo presenta las experiencias internacionales sobre reúso de aguas residuales, el cuarto capítulo corresponde a las técnicas de reúso doméstico, industrial, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias implementables en Colombia, el quinto es la contextualización y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia y sexto capítulo presenta las conclusiones y el último la bibliografía.

2. ENFOQUE METODOLÓGICO

El presente capítulo corresponde al primer entregable “Enfoque metodológico” el cual, de acuerdo con los pliegos de condiciones, desarrolla la propuesta metodológica y presenta con profundidad el abordaje conceptual, operativo y técnico de la metodología propuesta para cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos de la consultoría.

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Elaborar un estudio que contenga el análisis y documente las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias, y realice recomendaciones para la implementación y reglamentación del reúso de agua residual en Colombia.

2.1.2. Objetivos específicos

- Recopilar información acerca de experiencias exitosas en el proceso de implementación del reúso de agua residual en los países seleccionados, identificando entre otros volúmenes tratados y reusados, tecnologías y el marco legal, normativo e institucional.
- Recopilar información de técnicas de Reúso de aguas residuales domésticas, industriales, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias identificando requerimientos técnicos para su aplicación, identificar las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas que podrían ser aplicadas en Colombia considerando entre otros, un análisis de costo/beneficio.
- Formular recomendaciones de aplicación de las técnicas y tecnologías de acuerdo con el tipo de agua residual.
- Analizar el contexto colombiano en materia de reúso de agua residual (domésticas, industriales y drenaje agrícola) identificando las restricciones a la implementación del mismo y formular las recomendaciones en materia normativa e institucional que podrían impulsar el desarrollo de este aspecto.

2.2. Enfoque

El DNP contrató la consultoría que tiene por objeto “elaborar un estudio que contenga el análisis y documente las técnicas de reúso de aguas residuales

domésticas, industriales, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias, y realice recomendaciones para la implementación y reglamentación del reúso de agua residual en Colombia”.

Los resultados del estudio le permitirán al país contar con elementos para dar cumplimiento a la línea de acción 23 del Documento Conpes 3934 de 2018, “Promover el reúso de agua residual tratada”, que se justifica en el potencial identificado para las aguas residuales, que se pueden constituir en fuente de abastecimiento de diferentes actividades económicas, principalmente en zonas de escasez hídrica. Contar con un documento que recoja las buenas prácticas para el reúso de aguas residuales, así como con un análisis de la normatividad actual, en especial de la Resolución 1207 de 2014, va a dar elementos para el análisis de la baja implementación de dicha norma en el país y con base en ello proponer recomendaciones para el fomento de esa fuente de agua.

De acuerdo con los estudios adelantados en el país, la disponibilidad de agua superficial ha venido disminuyendo. En el año 2000¹ se señalaba que el promedio de precipitación anual era de 3000 mm, con una escorrentía superficial equivalente a un volumen anual de 2.113 km³ (58 l/s/km²), mientras que en el año 2018 esa precipitación anual es de 2.918 mm para una escorrentía equivalente a un volumen anual de 2.026 km³ (equivalente a un estimado de 56,2 l/s/km²)². La cuenca Magdalena - Cauca, donde reside aproximadamente el 70% de la población del país y se concentra la mayor parte de la actividad socioeconómica, cuenta únicamente con un rendimiento promedio de 31,7 l/s/km² ³. Adicionalmente como lo muestra el Gráfico 1, la tendencia desde el año 2010 en todas las cuencas hidrográficas es la disminución de esa escorrentía media anual, por lo cual es necesario establecer estrategias de uso eficiente y conservación del recurso a largo plazo. Esta condición sumada a los altos consumos demandados por el sector agrícola y al bajo nivel de tratamiento de las aguas residuales, que según el Estudio Nacional de Agua 2018, de la información reportada por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, en 2016 en el país alcanza solo el 42,2 %⁴ de aguas residuales tratadas en términos de caudal que se descarga a los cuerpos de agua, impone un reto para lograr avanzar en el reúso de las aguas residuales, de manera que se pueda convertir en una fuente de agua para algunas actividades.

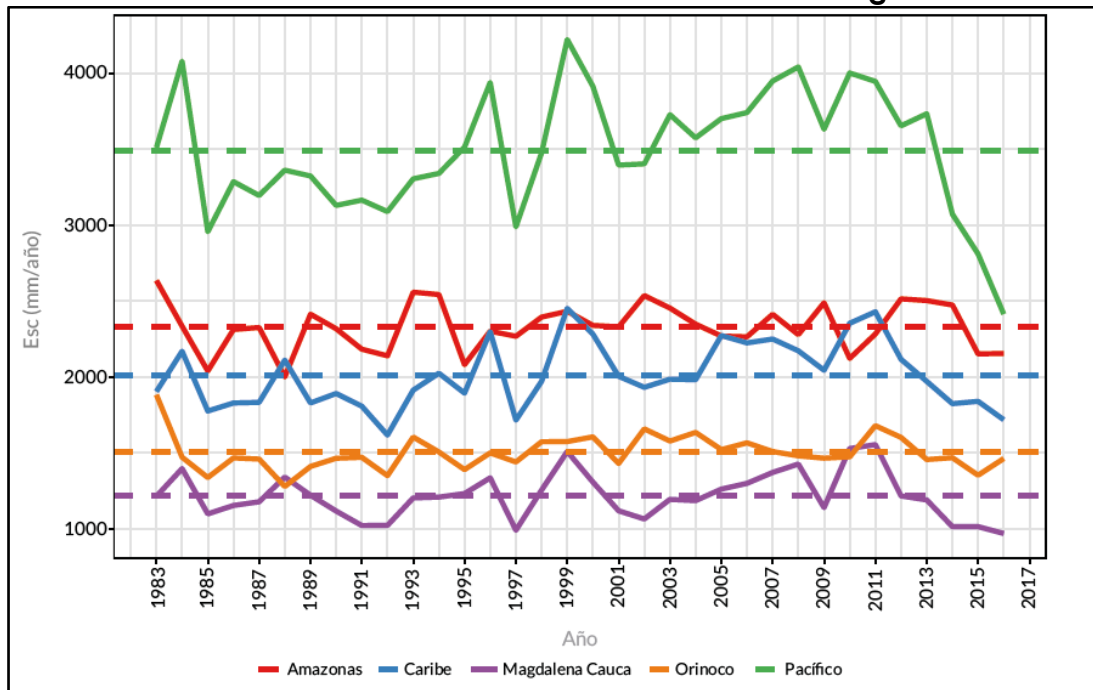
¹ Agua para el siglo XXI América del Sur – De la visión a la acción- informe nacional sobre la gestión del agua en Colombia 2000 – CEPAL- Proyecto GWP- SAMTAC

² Estudio Nacional del Agua 2018 - IDEAM

³ Estudio Nacional del Agua 2014 - IDEAM

⁴ Estudio Nacional del Agua 2018 - IDEAM

Gráfico 1. Escorrentía media anual Cuencas hidrográficas



Fuente: Estudio Nacional del agua -2018 IDEAM.

En la mayoría de los países, excepto en los más desarrollados, la mayor parte de las aguas residuales se vierte directamente al medio ambiente sin un tratamiento adecuado, lo cual tiene repercusiones negativas en la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos de agua dulce y los ecosistemas.

La presión sobre los recursos hídricos está impulsando la necesidad de un mejor uso de las aguas residuales que son generadas por sus diferentes usos. El crecimiento de la población, la urbanización, los cambios en los patrones de consumo, el cambio climático, la pérdida de biodiversidad, el crecimiento económico y la industrialización tienen impacto en los recursos hídricos y las corrientes de aguas residuales, con repercusiones en la contaminación atmosférica, terrestre y del agua. En este sentido, los métodos mejorados para la gestión de aguas residuales ayudarán a aliviar el impacto de dichos factores.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) adoptó los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el objetivo 6 "Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos" tiene como una de las metas "Consumo y escasez del agua" y establece "Para 2030, aumentar sustancialmente la eficiencia en el consumo de agua para todos los sectores y lograr una extracción y un abastecimiento sostenible del agua dulce para hacer frente a la escasez de agua, y reducir sustancialmente el número de personas que la padecen". Lo anterior, de acuerdo con la ONU, significa "(...)

maximizar la productividad de las actividades económicas y al mismo tiempo minimizar su consumo de agua, esto es, generar más productos por volumen de agua extraída, reduciendo el desperdicio de agua; guarda estrecha relación con el concepto de producción y consumo sostenible.”

Específicamente el objetivo 6.3 de los ODS establece como meta de aquí a 2030, mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la minimización de la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

Los bajos niveles de tratamiento de las aguas residuales muestran la imperiosa necesidad de realizar mejoras tecnológicas y de contar con opciones seguras para la reutilización del agua y así alcanzar la Meta 6.3. Las iniciativas necesarias para lograr esta meta implicarán una carga económica más importante para los países de bajos ingresos e ingresos medios-bajos, lo cual los pone en una situación de desventaja económica frente a los países de ingresos altos e ingresos medios-altos.

Por su parte, la Estrategia Nacional de Economía Circular del Gobierno Nacional propende por un nuevo desarrollo económico que incluye la valoración continua de los recursos, el cierre de ciclos de materiales, agua y energía, nuevos modelos de negocio y la simbiosis industrial para optimizar la eficiencia en la producción y consumo de materiales y reducir la huella de carbono y la huella hídrica. Esta estrategia hace énfasis en seis líneas de acción representadas en seis ciclos: (i) Materiales y productos industriales; (ii) Materiales de envases y empaques; (iii) Optimización y aprovechamiento de biomasa; (iv) Ciclo del agua; (v) Fuentes y aprovechamiento de energía; (vi) Gestión de materiales en centros urbanos.

Igualmente, en el marco de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), dentro de los instrumentos de política ambiental y como parte del desempeño ambiental que debe tener el gobierno al pertenecer a esta organización, se encuentra el “Desarrollar programas de ahorro y uso eficiente del agua y la energía y medidas de reducción, reutilización, reciclado y valorización”.

En el contexto de una economía circular, donde se busca un equilibrio entre el desarrollo económico, la protección de los recursos naturales y la sostenibilidad ambiental, las aguas residuales constituyen un recurso abundante y valioso, por lo cual una mejor gestión de las aguas residuales será fundamental para el crecimiento verde, especialmente en el ámbito de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

En todo caso, para maximizar el potencial de las aguas residuales como recurso valioso y sostenible, de acuerdo con lo mencionado en diferentes análisis realizados a nivel mundial, es necesario crear un entorno propicio para el cambio, lo cual incluye la creación de marcos jurídicos y regulatorios adecuados, mecanismos de financiamiento pertinentes y aprobación social.

Otro aspecto a tener en cuenta, consiste en la implementación de tecnologías en función tanto de su efectividad de tratamiento, como en función de sus costos de operación. En este sentido, dentro el Plan Director de Agua y Saneamiento Básico del Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, se menciona que en el país se han presentado varios casos en los cuales se han construido las plantas de tratamiento, pero se han abandonado o han dejado de funcionar debido a los altos costos de operación y mantenimiento, insuficiencia de financiamiento y falta de capacidad institucional⁵.

2.3. Aproximación conceptual y metodológica

2.3.1. Aproximación técnica y metodológica

Para el desarrollo del estudio, se tendrán como base los objetivos generales y específicos definidos en los términos de referencia, para lo cual, cada uno de ellos se asocia con los diferentes productos a entregar como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Objetivos de los productos

| Objetivo | Producto |
|--|--|
| Recopilar información acerca de experiencias exitosas en el proceso de implementación del reúso de agua residual en los países seleccionados, identificando entre otros volúmenes tratados y reusados y el marco legal, normativo e institucional. | Documento técnico que contenga experiencias internacionales sobre reúso de aguas residuales. |
| Recopilar información de técnicas de Reúso de aguas residuales domésticas, industriales, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias identificando requerimientos técnicos para su aplicación, identificar las técnicas de reúso de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas que podrían ser aplicadas en Colombia considerando entre otros, un análisis de costo/beneficio | Documento con las técnicas de reúso doméstico, industrial, drenaje agrícola y uso de agua lluvia implementables en Colombia. |

⁵ Plan Director Agua y Saneamiento Básico Visión Estratégica 2018-2030, 2018, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio

| Objetivo | Producto |
|--|---|
| Formular recomendaciones de aplicación de las técnicas y tecnologías de acuerdo con el tipo de agua residual. | <p>Documento técnico que contenga experiencias internacionales sobre reúso de aguas residuales.</p> <p>Documento con las técnicas de reúso doméstico, industrial, drenaje agrícola y uso de agua lluvia implementables en Colombia.</p> |
| Analizar el contexto colombiano en materia de reúso de agua residual (domésticas, industriales y drenaje agrícola) identificando las restricciones a la implementación del mismo y formular las recomendaciones en materia normativa e institucional que podrían impulsar el desarrollo de este aspecto. | Documento que contenga la contextualización y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia y Taller de socialización del desarrollo de la consultoría |

Fuente: Firma consultora con base en los términos de referencia.

2.3.2. Análisis Contextualización Internacional reúso de agua residual

De acuerdo con lo previsto en los pliegos de condiciones, se va a analizar la experiencia de reúso de agua residual de 5 países (3 países latinoamericanos, 2 fuera de Latinoamérica) los cuales se citan a continuación:

- México
- Chile
- Perú
- Sudáfrica
- Israel

Con el fin de documentar el reúso de aguas residuales a nivel internacional de los países seleccionados se realizará inicialmente una recopilación de información primaria y secundaria.

La información primaria provendrá de los acercamientos a funcionarios o entidades ambientales relacionadas con el tema, así como con expertos o personas encargadas de la aplicación de reúso en los diferentes países. Se partirá de la identificación de actores con el fin de precisar los más relevantes del sector y las técnicas a documentar.

Posteriormente se realizará el diseño de las preguntas básicas de investigación a realizar a cada uno de los actores identificados, que permitirá un análisis más profundo y una mayor utilidad a la información a recolectar, lo cual es posible

luego de la comprensión profunda del sector a consultar, mediante el diagnóstico preliminar del mismo el cual se realiza a partir de las fuentes secundarias analizadas.

De acuerdo con la revisión inicial de actores, se realizará la selección de aquellos considerados más relevantes, para esto se contará con apoyo de los expertos del equipo de trabajo en el tema a analizar, los cuales llevarán a cabo la revisión de fuentes secundarias, reuniones de diálogo e intercambio de información entre los actores identificados.

Se aplicará el cuestionario a partir de las preguntas propuestas que permitirá recolectar la información necesaria de cada una de las experiencias internacionales a documentar (en el Anexo 1, se encuentra el formato de cuestionario previsto), el cual será aplicado a cada uno de los actores identificados.

La información secundaria provendrá de estudios, informes, documentos y normas disponibles de cada país seleccionado, con relación a la implementación de reúso de aguas residuales.

Con el fin de recopilar esta información se realizará una búsqueda inicial a través de internet para cada uno de los países, que permitirá identificar el estado del arte de estos países en cuanto a datos, informes o estudios que existan sobre reúso de aguas residuales. La recopilación de información secundaria se centrará en:

- Publicaciones de entidades públicas como ministerios y empresas del Estado y gubernamentales.
- Publicaciones de organismos internacionales como la OEA, Banco Mundial, Banco Alemán, BID, entre otros.
- Documentos existentes que sirvan para realizar análisis de estudios especializados en reúso de agua, estudios de mercado, diagnósticos, técnicas, y proyectos de implementación de técnicas de reúso, entre otros.
- Normas técnicas y legales que permitan determinar el proceso normativo sobre reúso en cada país.
- Artículos de revistas especializadas e investigativas.

A partir de esta revisión inicial se determinará la viabilidad y pertinencia de cada uno de los documentos recopilados y posteriormente se realizará la síntesis de estos, que incluya la identificación de la información más relevante sobre el tema de requerido en la consultoría. Es importante analizar y recopilar información en cuanto a las nuevas experiencias de países de la región y de otros continentes

que, a partir de la implementación de estas tecnologías, han podido potenciar el reúso de aguas residuales. Esta información estará referenciada en el documento según sea el caso.

Con la información primaria y secundaria recopilada, se realizará el análisis y documentación de las técnicas de reúso de agua implementadas en cada país que sirvan como insumo para proponer recomendaciones y ajustes requeridos en Colombia. Para cada país se analizará:

- Generalidades de cada país en cuanto a localización, oferta hídrica, precipitaciones, etc.
- **Descripción del(os) Proyecto(s):** Descripción general del(os) proyecto(s) desarrollado(s), los actores involucrados y la experiencia adelantada en cada país.
- **Aspectos técnicos:** Se efectuará un análisis de los siguientes aspectos: contexto de cada país a investigar, población objetivo, características de las aguas y características de los sistemas incorporados al programa de reúso.
- **Aspectos Institucionales:** Para la implementación de los diferentes tipos de reúso de las aguas residuales se efectuará un análisis de los actores relevantes o instituciones involucrados en el tema, así como del marco de las decisiones de política que fueron adoptadas por cada país.
- **Aspectos Legales:** Como desarrollo de las decisiones de política, se recopilará las normas existentes que contienen el marco legal de cada país relacionadas con el reúso de aguas residuales y aguas lluvias. Se buscarán también iniciativas normativas propuestas no adoptadas y los antecedentes de las mismas.
- **Aspectos Económicos:** Se efectuará la revisión y análisis de los costos de los Proyectos, costos de operación y fuentes y esquemas de financiación.
- **Lecciones aprendidas:** Se realizará la revisión de las dificultades y retos de cada proceso y las soluciones planteadas para cada caso.

Para cada uno de los países se documentará mínimo 2 técnicas por tipo de uso implementadas para reúso doméstico, industrial y drenaje agrícola en cada país, igualmente se realizará la revisión de técnicas de uso de agua lluvia en los países que apliquen.

La recopilación de experiencias de otros países permitirá contar con ejemplos para analizar y entender las condiciones en que fueron implementados, entre ellos, el marco legal e institucional de cada país, las características de las aguas residuales, las tecnologías empleadas, su escala y los costos asociados; las ventajas y desventajas de las medidas implementadas; los análisis costo beneficio o de

conveniencia que soportaron las decisiones de implementar el reúso de agua; los resultados obtenidos, el mercado existente que permitió avanzar en el reúso de agua; así como las dificultades y retos que en general debieron enfrentar. Lo anterior aportará una visión de conjunto, integrando sus particularidades, dado que la contextualización de las condiciones de cada experiencia permite tener elementos que deben ser considerados para la formulación de recomendaciones de las posibles alternativas a implementar en Colombia.

Es necesario tener en cuenta que, si bien existen alternativas tecnológicas disponibles que facilitan el reúso de aguas con diferentes características, los beneficios de cada una de ellas dependen de factores no solo de eficiencia sino de las particularidades que condicionan los beneficios de su implementación. No se puede hablar de manera generalizada que una alternativa es buena o mala, sin tener en cuenta donde va a ser implementada, quien va a ser el responsable de su implementación, la capacidad institucional para hacerlo, el contexto normativo y de política que permitan su desarrollo, entre otros.

2.3.3. Análisis de técnicas de reúso implementables en Colombia

Con base en las experiencias internacionales, así como de los casos de reúso de aguas residuales que se analizarán y han sido empleados en Colombia, se preparará un documento técnico con al menos 3 técnicas disponibles para el reúso de aguas residuales domésticas, industriales, y uso de aguas lluvias y 2 de drenaje agrícola.

Inicialmente se realizará una revisión de las experiencias que se han tenido en el país. Por ejemplo, para usos de agua residual tratada y sin tratar directa o indirectamente en aplicaciones agrícolas (distritos de riego y monocultivos, entre otros), uso industrial en la pequeña y mediana industria documentados por la Cámara de Comercio de Bogotá- Programa Acercar, Secretarías distritales de ambiente de grandes ciudades en especial de Bogotá, y casos de reúso de aguas industriales tratadas dentro de la gran industria que puedan ser documentadas y que permitan conocer las condiciones y dificultades que se han enfrentado.

Así mismo se realizará una recopilación de información secundaria de las entidades relacionadas con el tema como el IDEAM, DANE, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), empresas de servicios públicos (ESP), con el fin de efectuar caracterizaciones que permitan determinar y priorizar, en lo posible, el tipo reúso por región, o por tamaño poblacional.

A partir de la información secundaria recopilada, se realizará la evaluación de cada uno de los documentos con el fin de determinar la relevancia de cada uno y establecer los vacíos de información que requieren de otros procesos de

recolección.

Mediante este análisis se diseñará un formato de entrevista semiestructurada para ser aplicada a los expertos sectoriales con experiencia en el tema de reúso, por ejemplo, Asocars, CAR, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, que permitan garantizar la veracidad de información recolectada y obtener la información faltante.

Posteriormente se realizará el análisis de las diferentes técnicas de reúso a ser implementadas en Colombia, que tendrá en cuenta contexto y restricciones en la implementación, requerimientos para su implementación, los respectivos costos de inversión-implementación y operación de la(s) tecnologías involucrada(s), la población beneficiada por tipo de reúso, tiempos y facilidades para su instalación, oferta de proveedores y repuestos en el país y eficiencia de tratamiento, entre otros aspectos.

Igualmente se elaborará un análisis costo beneficio por cada una de las 6 regiones del país mencionadas en los pliegos de condiciones: Amazonia, Andina, Caribe, Insular, Orinoquía, Pacífico.

Para ello, se tendrán en cuenta las condiciones particulares de cada región en cuanto a actividades económicas que realizan, disponibilidad de fuentes de agua, densidad de población, índice de escasez de agua, coberturas de agua potable, costo promedio del metro cúbico de las empresas que prestan el servicio de acueducto y costos de energía, entre otros.

2.3.4. Contextualización y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia

Con base en el análisis de experiencias internacionales y en el conocimiento de las alternativas tecnológicas existentes presentadas en los dos numerales anteriores, se preparará un documento que contenga las recomendaciones para incentivar el reúso en Colombia. Para ello, se partirá de un análisis de la normatividad vigente en el país, así como las líneas de política pública y normatividad que han sido trazadas, entre ellos la Resolución 1207 de 2014, Resoluciones 631 y 2659 de 2015, Decreto 3930 de 2010, plan de reconversión a tecnologías limpias en gestión de vertimientos, Estudio Nacional del Agua 2014 y 2018, y el Documento Conpes 3934 de 2018, entre otros. Así mismo, se analizarán las directrices de la agenda 2030 frente a las aguas residuales y su reutilización segura.

Entre los análisis que se considerarán es pertinente revisar los aspectos relacionados con las dificultades que se tienen para realizar el tratamiento de

aguas residuales en la mayoría de los municipios del país, lo cual está directamente relacionado con la baja capacidad de pago de los usuarios, los costos de operación de las plantas de tratamiento, el cumplimiento de las normas vigentes, así como la inadecuada selección de la tecnología de tratamiento empleada, que afectará las posibilidades del reúso para algunos casos en donde esté disponible el agua residual como recurso.

Igualmente se llevará a cabo un análisis de las condiciones en las cuales exista la necesidad de usar las aguas residuales tratadas para llevarlas a las condiciones que permiten su utilización, teniendo en cuenta la carencia del recurso agua en una región o municipio. Lo anterior, dado que en los casos en que se requiera tener una fuente alternativa de agua (uso del agua residual como recurso), los usuarios podrán tener mayor interés y pueden estar dispuestos a realizar un pago para alcanzar los objetivos del tratamiento de forma parcial o total para contar con este recurso. Estos aspectos se analizarán teniendo en cuenta la información recopilada y estudios disponibles sobre las oportunidades del reúso en Colombia.

Otro aspecto que se revisará es la oportunidad de utilizar el agua residual tratada como fuente de reúso de manera indirecta. Esto, dado que si bien existe la posibilidad de reusar el agua tratada directamente (posterior a un tratamiento secundario y terciario previo, luego de su monitoreo para asegurar que cumpla con los requerimientos de calidad), también es posible que esos efluentes tratados puedan ser descargados a un cuerpo receptor para posteriormente ser utilizados de forma intencional y planeada en algunos de los usos potenciales, de acuerdo con la calidad del cuerpo de agua, lo que se denomina de uso indirecto⁶.

La situación anterior es una práctica actual en muchos países, donde los cuerpos de agua que han recibido descargas sin tratamiento previo son usados para el consumo humano después de que se realiza el proceso de tratamiento y potabilización. La diferencia sobre esta práctica está en la utilización mediante procesos programados y establecidos para el uso seguro de la fuente de agua con la participación de los entes reguladores de los recursos y de los municipios involucrados en las prácticas.⁷

Con base en los análisis realizados, se presentarán las propuestas de ajustes que sean requeridos a nivel de política, entre ellos directrices y líneas estratégicas a implementar por parte de las entidades competentes, así como a nivel de las

⁶ Descripción realizada de las definiciones establecidas en "Uso Seguro del Agua para el Reúso". reúso de aguas residuales tratadas como fuente directa e indirecta de agua potable. Moeller, Guillen, Treviño, Lizama - Cap. 6. AIDIS

⁷ "Uso Seguro del Agua para el Reúso". reúso de aguas residuales tratadas como fuente directa e indirecta de agua potable. Moeller, Guillen, Treviño, Lizama - Cap. 6. AIDIS

normas vigentes. Con esto se busca solucionar uno de los problemas que tiene el reúso a nivel mundial, como lo es la inexistencia, o es muy escasa legislación sobre las normas de calidad para estos productos, lo cual fomenta la incertidumbre en el mercado que va en detrimento de las inversiones que se realicen.

Para la elaboración de las propuestas de ajustes requeridos dentro del ordenamiento jurídico colombiano, resulta necesario tener en cuenta a los actores involucrados dentro del reúso de agua en Colombia.

De esta forma, se podrán tener en cuenta, además de las instituciones estatales que tengan competencia sobre el tema, la visión de otros actores que pueden ser relevantes y coadyuven a la materialización de diferentes sistemas de reúso en Colombia. A continuación, de manera preliminar, el Gráfico 2 presenta el mapa de actores relacionados con el reúso de agua en Colombia:

Gráfico 2. Actores preliminares Reúso de Agua



Fuente: Firma consultora

3. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES SOBRE REÚSO DE AGUAS RESIDUALES

El presente capítulo corresponde al segundo entregable “Documento técnico que contenga experiencias internacionales sobre reúso de aguas residuales.” el cual, de acuerdo con los pliegos de condiciones, presenta un análisis de la experiencia en reúso de 5 países, México, Chile, Perú, Israel y Sudáfrica. Se presenta la experiencia de cada uno de los países analizados desde el punto de vista técnico, institucional, legal, económico.

3.1. Antecedentes

El aumento de la población ha generado un crecimiento de la demanda de agua a nivel mundial para el desarrollo de diferentes actividades cotidianas como la higiene, el consumo, las actividades económicas, entre otras. Así mismo, se requiere mayor cantidad de agua para el cultivo de alimentos que pretende atender las necesidades alimentarias básicas debido al aumento de la población. Según el Instituto Internacional de Gestión de Agua (IWMI, por sus siglas en inglés) se espera que la demanda de agua aumente en un 80% para el año 2050.

A medida que aumenta la demanda total de agua, la cantidad de aguas residuales producidas y la carga contaminante aumentan continuamente en el mundo entero, lo cual, sumado a la limitada cantidad de agua dulce disponible, conlleva a que se esté considerando el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas como una fuente no convencional del recurso hídrico. No obstante, en todos los países, salvo en los más desarrollados, la gran mayoría de las aguas residuales se vierte directamente en el medio ambiente sin un tratamiento adecuado, lo cual genera daños a la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos ambientales y los ecosistemas. Se estima que la capacidad actual de tratamiento es el 70% de las aguas residuales generadas en países de altos ingresos, y solo el 8% en países de bajos ingresos. (WWAP, 2017).

Para el caso de América Latina y el Caribe (ALC), como región, solo el 20% de las aguas residuales domésticas reciben algún grado de tratamiento. El Banco mundial⁸ señaló en el año 2013 que el “70% de las aguas residuales de la misma región no son tratadas” y el BID⁹ en agosto 28 de 2017 en Estocolmo Suecia indicaba que “Hoy en día el 77% de la población de América Latina y el Caribe carece de acceso a saneamiento seguro. Se estima que únicamente el 28% de las aguas residuales recolectadas por la red pública recibe algún tipo de tratamiento antes de ser vertida en el ambiente”

⁸ Carmen Yee-Batista -especialista en agua y saneamiento del Banco Mundial- Tomado de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/01/02/rios-de-latinoamerica-contaminados>

⁹ Tomado de <https://www.iadb.org/es/noticias/anuncios/2017-08-28/semana-mundial-del-agua-america-latina-y-el-caribe%2C11874.html>.

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fijó objetivos integrales para el agua. Específicamente la Meta 6.3 de los ODS establece:

“De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial”.

Con el fin de alcanzar la Meta 6.3 de los ODS, se han propuesto dos indicadores globales para monitorear el progreso de la meta" (WWAP, 2017):

6.3.1 Proporción de aguas residuales tratadas de forma segura: *Las aguas residuales generadas por los hogares (lodos residuales y fecales) y las actividades económicas (p. ej., las industrias) tratadas de forma segura en proporción al total de aguas residuales generadas por los hogares y las actividades económicas.*

6.3.2 Proporción de las masas de agua con buena calidad del agua ambiental: *Proporción de masas de agua (área) en un país con buena calidad de agua ambiental en comparación con todas las masas de agua en el país. «Bueno» indica una calidad de agua ambiental que no daña las funciones del ecosistema ni la salud humana de acuerdo con los indicadores centrales de la calidad del agua ambiental.*

Las iniciativas necesarias para lograr esta meta implicarán una carga económica más importante para los países de bajos ingresos e ingresos medios-bajos, lo cual los pone en una situación de desventaja económica frente a los países de ingresos altos e ingresos medios-altos.

Muchos países se han trazado metas para incrementar el reúso de aguas residuales, ya que constituyen una fuente importante de abastecimiento de agua en algunas ciudades, pues permite satisfacer la demanda creciente del recurso que se presenta debido a la escasez que se vive actualmente.

La principal destinación del reúso de las aguas residuales es la agricultura, sin embargo, hay una creciente demanda para otras actividades, como la industria y el consumo humano, debido a la presión que existe sobre el recurso agua en todo el planeta y en la mayoría de los países latinoamericanos por causa de la concentración de población e industria; la limitada disponibilidad del recurso; la estacionalidad de la oferta; la sobreexplotación de fuentes superficiales y acuíferos; y el cambio climático, entre otros.

El libro Water Reuse (Binnie & Kimber, 2008), realiza una clasificación de los países que presentan mayor reutilización de aguas residuales (tratadas y no

tratadas). Los datos reportados no son exactos ya que en muchos países no se tienen en cuenta los datos del uso de aguas residuales no tratadas.

Según la clasificación, los países con el mayor porcentaje de uso total del agua residual tratada y no tratada son Kuwait, Israel y Singapur.

Tabla 2. Ranking de países que reutilizan aguas residuales

| Rango | País | % de reuso total de agua residual | Rango | País | Reuso / % de reuso total de agua residual |
|-------|------------------------|-----------------------------------|-------|---------|---|
| 1 | Kuwait | 35,2% | 12 | Namibia | 4,3% |
| 2 | Israel | 18,1% | 13 | Baréin | 4,2% |
| 3 | Singapur | 14,4% | 14 | Chile | 2,4% |
| 4 | Catar | 13,3% | 15 | Omán | 1,9% |
| 5 | Chipre | 10,4% | 16 | Siria | 1,9% |
| 6 | Jordania | 8,1% | 17 | Bolivia | 1,1% |
| 7 | Emiratos Árabes Unidos | 8,0% | 18 | Egipto | 1,0% |
| 8 | Malta | 7,8% | 19 | Libia | 0,9% |
| 9 | Túnez | 7,1% | 20 | Perú | 0,9% |
| 10 | México | 6,7% | 21 | China | 0,9% |
| 11 | Arabia Saudita | 5,5% | 22 | Corea | 0,8% |

Fuente: Chris Binnie, Martin Kimber, Wastewater an international survey of current practice, issues and needs, 2008

Para el tratamiento de las aguas residuales, existen una gran cantidad de tecnologías, que han permitido obtener resultados cada vez más eficientes, a fin de reducir los costos asociados al proceso de descontaminación que requieren estas aguas. Asimismo, se han venido implementando tecnologías de aprovechamiento de aguas lluvia, ya que sus características permiten utilizarla para diferentes usos, con o sin tratamiento.

Las aguas residuales son utilizadas principalmente y de manera más eficiente, en riego agrícola; infiltración a los acuíferos del subsuelo, en donde este actúa como filtro natural, como aguas de enfriamiento en aplicaciones industriales, riego municipal (como campos de golf y zonas verdes públicas); aguas para recreo designadas solamente para un contacto corporal parcial; y uso doméstico no potable (como el inodoro, sanitario, lavado de carros y zonas duras). Lo anterior no solo muestra la importancia del reúso del agua residual en función de los aspectos ambientales, sanitarios y de suministros sino también desde el punto de vista económico.

El economista Diego Juan Rodríguez en su blog del Banco Mundial¹⁰, comenta que de manera creciente se está repensando el modelo existente de tratamiento de aguas residuales, con un cambio de paradigma que permita eliminar el actual esquema tradicional basado en una visión lineal a un modelo de economía circular. Esto, con el objetivo de lograr la regeneración de las aguas residuales para uso en actividades domésticas, industriales o agrícolas, de manera que se solucione el problema de escasez de agua en todo el mundo, causado por el cambio climático y el acelerado aumento de la población de los últimos años.

Para el caso de Latinoamérica, como región, es importante que se plantee un cambio de paradigma mediante el desarrollo de un nuevo marco normativo que establezca los estándares mínimos para la calidad del agua residual que va a ser reusada, incentivos inter-sectoriales para fomentar el uso de este recurso, planificar las cuencas que hacen parte de cada país y evaluar las plantas de tratamiento bajo un análisis de ciclo de vida completo incluyendo los aspectos financieros, ambientales y sociales. (Rodríguez, 2018)

Reúso en Agricultura

La agricultura representa alrededor del 70% del uso de agua a nivel mundial, principalmente para la producción de alimentos, fibras y procesamiento de productos agrícolas. La falta de recursos hídricos convencionales (acuíferos, ríos y lagos) ha llevado a la creciente reutilización de las aguas residuales domésticas y municipales (ya sea tratadas o sin tratar) para el riego. (FAO, 2013)

La utilización de las aguas residuales domésticas en áreas agrícolas es una práctica antigua, sin embargo, la mayor proliferación de sistemas de aplicación de aguas residuales en el suelo ocurrió durante la segunda mitad del siglo XIX, principalmente en países como Alemania, Australia, Estados Unidos, Francia, India, Inglaterra, México y Polonia.

¹⁰ Rodríguez, Juan. 2018. Tratamiento de aguas residuales: Elemento necesario en una economía circular. Recuperado: <http://blogs.worldbank.org/es/voices/tratamiento-de-aguas-residuales-elemento-necesario-en-una-economia-circular>

Actualmente, la utilización de efluentes urbanos es reconocida como alternativa viable para aumentar la disponibilidad local de recursos hídricos y por su aporte de nutrientes fertilizantes para las plantas, sin embargo, la puesta en marcha de esta actividad requiere de determinadas medidas para evitar riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. (FAO, 2013)

Un obstáculo en el proceso para minimizar los riesgos por el uso de aguas residuales obedece a la falta de reconocimiento de la agricultura urbana como una estrategia de supervivencia para esta población. La adopción de cualquier medida o de políticas depende de que las autoridades y tomadores de decisión aborden el tema de la agricultura urbana con seriedad. Los agricultores utilizan aguas residuales por necesidad, lo cual es una realidad que no puede ser negada o prohibida. Sin embargo, el uso de aguas residuales para la agricultura urbana es visto, por lo general, de forma negativa por el público y por los funcionarios de gobierno y esto contribuye a la imagen negativa que tiene la agricultura urbana. (Buechler, Hertog, & Van Veenhuizen, 2003)

Con el propósito de estandarizar las categorías empleadas para los usos de aguas residuales para riego se han desarrollado tipologías que sirven para llevar a cabo evaluaciones sobre el grado del uso de aguas residuales en ciertos países alrededor del mundo.

En las tipologías de riego se diferencia los usos directos e indirectos de las aguas residuales, según si éstas no son diluidas (por ejemplo, si son tomadas directamente de las descargas del alcantarillado), o si son diluidas con agua de los cuerpos de agua superficiales antes de su utilización, como el agua de río.

También se categoriza al agua según el grado de dureza relativa de los diferentes tipos dentro de un área urbana determinada, el grado (magnitud y tipo) de tratamiento de las aguas residuales y el uso de las aguas residuales en esquemas de irrigación formales (a través del riego con una infraestructura que tenga ciertos permisos y el control de agencias estatales), o informales (en muchos sitios y muy dispersos). (Buechler, Hertog, & Van Veenhuizen, 2003)

En el año 2006, la OMS definió las directrices para el uso seguro de las aguas residuales, donde se aplican enfoques de gestión de riesgos según el Marco de Estocolmo y se recomienda definir objetivos sanitarios realistas, además de evaluar y administrar los riesgos. Dependiendo de las circunstancias, existen varias medidas posibles de protección de la salud (barreras), que incluyen el tratamiento de desechos, restricción de cultivos, adaptación de técnicas de riego y tiempo de aplicación y control de la exposición humana.

Las directrices de la OMS-FAO recomiendan definir metas sanitarias realistas y evaluar y manejar los riesgos de manera continua, desde la generación de las aguas residuales hasta el consumo de productos cultivados con estas, con el fin de lograr las metas propuestas. Esto permite que exista un sistema reglamentario y de monitoreo acorde a las realidades socioeconómicas del país o localidad.

El Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI, en inglés), en colaboración con el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID) convocó a un acuerdo de voluntades por medio de un taller internacional denominado Uso de Aguas Residuales para la Agricultura de Regadío: Haciendo Frente a las Realidades de los Medios de Subsistencia y el Medio Ambiente, que se realizó en Hyderabad, India del 11 al 14 de noviembre de 2002. En este taller se reunieron investigadores y profesionales en los sectores hídrico, sanitario, medioambiental, agrícola y acuícola de 27 instituciones internacionales y de México y como conclusiones presentaron:

- Las aguas residuales (crudas, diluidas o tratadas) son un recurso que adquiere cada vez más importancia global, especialmente en la agricultura urbana y periurbana.
- Con un manejo adecuado, el uso de aguas residuales contribuye significativamente a mantener los medios de subsistencia, la seguridad alimentaria y la calidad del medio ambiente.
- Sin un manejo adecuado, el uso de aguas residuales presenta graves riesgos para la salud humana y el ambiente.

Reúso como fuente de agua potable¹¹

Las tecnologías avanzadas de tratamiento que existen actualmente hacen posible el uso de las aguas residuales tratadas adecuadamente como fuente de suministro de agua potable y para su uso en la higiene personal.

En muchos países se han llevado a cabo estudios para demostrar que es técnicamente posible obtener agua potable perfectamente aceptable a partir de aguas residuales. El agua regenerada no es otra que el agua residual tratada o efluente tratado, que satisface los criterios de calidad para ser usada nuevamente. (Asano, 2001; Tchobanoglous, et al., 2011; EPA, 2012; Jiménez y Asano, 2008; Hespanhol, 2012; Mijaylova et al., 2001; Moeller et al., 1997; Moeller et. a., I 2011; Moeller, 2013; Segui, et al., 2014). El término “agua regenerada” es adoptado por las siguientes razones (Grobicki, 1999):

¹¹ Desarrollado y referido literalmente en algunos apartes del capítulo 2 “Panorama mundial del reúso de aguas residuales tratadas. Carl-Axel P. Soderberg” y capítulo 4 “Reúso de aguas residuales tratadas como fuente directa e indirecta de agua potable. Moeller Ch; Guillén; Treviño; Lizama, contenidos en el documento “Uso seguro del agua para el reúso. AIDIS. 2016”.

- a) Implica una connotación ambiental positiva y evita las connotaciones sociales negativas que los términos “reutilización de aguas residuales” o “reutilización del efluente tratado de aguas residuales” provocan en la población;
- b) Es un término cada vez más utilizado en la literatura.

El uso de agua regenerada para el suministro de agua potable, históricamente se ha dividido en dos categorías: reúso potable directo y reúso potable indirecto. Ambos emplean una secuencia de procesos de tratamiento de aguas residuales después del tratamiento convencional (NRC, US 2012).

El reúso potable directo (RPD) se refiere a la introducción de aguas residuales municipales tratadas (después de un tratamiento avanzado con un tratamiento convencional secundario y terciario previos) en forma directa en el sistema de distribución de agua, luego de un extenso monitoreo para asegurar que se cumpla en todo momento con los estrictos requerimientos de calidad. Esto implica mezclar el agua tratada con el agua proveniente de una fuente determinada para un posterior tratamiento, o incluso la mezcla, tubería a tubería, del agua tratada y el agua potable (Lazarova, et al. 2013).

El reúso potable indirecto (RPI) planeado sucede cuando los efluentes tratados son descargados de manera planeada a los cuerpos receptores para ser utilizados de forma intencional y controlada en algún uso benéfico.

El público en general se siente más seguro y confiado con el sistema de RPI en comparación con un sistema de RPD. Existe en algunas regiones, como en California (E.U.), el denominado “factor de asco” (yuck factor), que ha influenciado para que en ese Estado no hayan avanzado proyectos para adelantar el reúso del agua tratada a pesar de sequías de largos años que continúan drenando acuíferos y embalses¹².

No obstante, en 2008, en Estados Unidos (EEUU), el Condado de Orange California comenzó a inyectar 70 MGD (Millones de Galones Día), es decir 265,000 metros cúbicos de aguas residuales tratadas con tratamiento avanzado al acuífero que suple el agua potable. Esa es la primera vez que en los EEUU se reusaron de forma planificada aguas residuales tratadas para abastecer una fuente de agua potable (EPA, 2012).

Este proceso es realizado a partir de un sistema de reabastecimiento de agua subterránea (GWRS). El Distrito sanitario del condado se encarga de realizar el

¹² Los Ángeles Times - <https://www.latimes.com/local/california/la-me-toilet-to-tap-20150525-story.html#page=1>

tratamiento previo del agua residual y posteriormente la somete a un proceso de purificación. La purificación previa al GWRS incluye tratamientos preliminar, primario y secundario. (OCWD, 2015)

Para realizar el proceso de purificación, el sistema GWRS opera mediante un sistema avanzado de tres pasos: la microfiltración, la ósmosis inversa y la luz ultravioleta con peróxido de hidrógeno. Esta agua purificada se inyecta dentro de una barrera hidráulica de agua marina y se bombea para recargar las cuencas donde se filtra de manera natural hacia la cuenca de agua subterránea del condado de Orange y complementa el suministro de agua potable de éste. (OCWD, 2015)

El aseguramiento de la calidad del agua para el GWRS comienza en el Distrito Sanitario del Condado de Orange (OCSD), el cual cuenta con un programa galardonado de control de las fuentes que ha ayudado a disminuir la cantidad de contaminantes tóxicos que entran al alcantarillado. (OCWD, 2015)

En el 2014 y 2015, dos ciudades del estado de Texas iniciaron operaciones de sistemas de reúso de aguas residuales tratadas que abastecen directamente a plantas potabilizadoras. (Steinle-Darling, E, 2015).

En los Estados Unidos, en 30 lugares reúsan aguas residuales tratadas para inodoros y uriniales en centros comerciales y edificios de oficinas y otros edificios de gran tamaño.

En el año 2015, la ciudad de San Francisco del estado de California requirió que todo nuevo edificio de gran tamaño provea tratamiento a las aguas residuales para el reúso en los inodoros y uriniales. La ciudad de St. Petersburg en el estado de la Florida, provee el 40% de la demanda de agua con aguas residuales tratadas. (National Academy of Science, 2012).

La Academia de Ciencias de los Estados Unidos en el informe "Water Reuse: Potencial for Expanding the Nations Water Supply Through the Reuse of Municipal Wastewater" (2012), indicó que solo con las aguas residuales tratadas que se descargan al mar o a estuarios, en Estados Unidos se podría suplir el 27% de la demanda de agua potable de ese país.

Otro caso importante para resaltar es el de Windhoek en Namibia¹³. Este país tiene una precipitación media de 250 mm anuales, y una evapotranspiración de

¹³ Con análisis y textos literales tomados de
<https://www.asersagua.es/la-reutilizacion-potable-del-agua-en-windhoek-namibia-pietdupisani/>
https://asersagua.es/Asersa/Documentos/Resumen_T%C3%A9cnico_RMujeriego_reutilizaci%C3%B3n_potable_directa_Windhoek.pdf

370 mm anuales lo que hace que tan solo un 3% de la lluvia registrada forme parte de las aguas superficiales (2%) y subterráneas (1%). Windhoek está situada en el centro geográfico del país a 1700 m de altitud, y enfrenta dificultades para llevar agua desde las zonas donde se encuentran los ríos (que permanecen con baja agua y secos la mayoría del tiempo) debido a la distancia (750 km) y a la topografía adversa para llevar el agua a esa ciudad.

En 1957, la sobreexplotación del acuífero había provocado el descenso de los niveles piezométricos de 50 m. En 1958 se construyó el embalse (3,4 hm³) y la planta de potabilización de Goreangab. Tras diversos ensayos y estudios, en 1968 se decidió reconvertir la planta de potabilización en una planta de regeneración avanzada, que fue inaugurada en 1969 con una capacidad de 4300 m³/día y posteriormente ampliada hasta alcanzar los 7.500 m³/año en 1996.

El aumento de la población registrado tras la independencia (1990) hizo que en 1996 se acordara ampliar la reutilización de hasta un 35% y se iniciara la construcción de una nueva estación de regeneración avanzada de agua de 21,000 m³/día de capacidad. Esta obra fue inaugurada en 2002 y produce actualmente 16.000 m³/día de agua regenerada para consumo humano, lo que representa un aporte medio del 25% del agua consumida por la población. La planta de regeneración es operada por Wingoc, un consorcio internacional formado por Veolia, Berlinwasser International y Wabag, para lo cual se suscribió un contrato de 20 años, que debe seguir un protocolo basado en la calidad del agua producida.

La estación de regeneración avanzada de Goreangab se diseñó según la estrategia de "barreras múltiples", como forma de asegurar la retención de contaminantes, y recibe un afluente con mezcla de agua superficial del embalse de Gorengab y agua de las lagunas de maduración posteriores a la depuración biológica de la Estación de Gammans. El proceso de depuración tiene una duración de 3 días y se requiere de un día más para el proceso de regeneración avanzada. La calidad del agua regenerada es superior a la del agua potable obtenida desde fuentes superficiales. El agua regenerada es considerada como la fuente de mayor fiabilidad en la zona, insensible a la disminución de caudales prevista para la escorrentía superficial a consecuencia del aumento de temperatura provocado por el cambio climático. El agua regenerada y el agua potabilizada en otras instalaciones se mezclan, en proporción de 1 volumen de agua regenerada con 3 volúmenes de agua potabilizada de fuentes superficiales, utilizando pozos de impulsión disponibles en diferentes lugares de la ciudad, de modo que todos los consumidores reciben una mezcla de aguas similar.

La población registrada para el año 2015 era de 420,000 habitantes con una tasa de crecimiento del 5% anual y un consumo de 60.000 m³/día con una dotación de 140 l/hab-día, por lo cual se tiene prevista una ampliación del sistema de tratamiento y de regeneración y la implementación de tecnologías de reactores biológicos de membrana (MBR), a la que se añadirán nuevos procesos de regeneración avanzada del agua.

Reúso Industrial

El sector industrial es considerado como uno de los sectores que más recursos hídricos requiere y gasta, el uso de agua industrial representa el 19% del consumo total de agua. (WWAP, 2019) Se estima que el uso anual global de agua por parte de la industria aumente en 1.170 km³ / año para 2025. (Fernández Alba, y otros, 2003). Gran parte de este aumento se presentará en aquellos países en desarrollo que se encuentran actualmente en fase de crecimiento industrial acelerado.

Este sector es considerado como uno de los que genera mayor cantidad de aguas residuales en el mundo, que además contienen una carga de contaminantes y toxicidad significativos, que impactan los recursos hídricos, la salud humana y el medio ambiente.

Los sectores industriales que presentan mayor generación de aguas residuales en el mundo son el sector manufacturero, que incluye: productos alimenticios; textiles; papel y productos de papel; productos refinados de petróleo, químicos y productos químicos; metales básicos; vehículos de motor, remolques, semirremolques y otros equipos de transporte; otros tipos de manufactura; el sector de la energía termoeléctrica que incluye actividades de suministro de energía eléctrica, gas natural, vapor, agua caliente y similares a través de una infraestructura permanente (red) de líneas, cañerías y tuberías y la minería. (WWAP, 2017).

Existen una gran variedad de tratamientos para el agua residual generada en las industrias, que incluyen lagunas de estabilización, digestores anaeróbicos y los biorreactores para la producción de biogás, lodos residuales activados, diferentes tipos de membranas, radiación ultravioleta, ozonización, oxidación avanzada y el uso de los humedales de varios tipos, que permiten optimizar la calidad del agua para un próximo uso. (WWAP, 2017).

Varios países alrededor del mundo han desarrollado diferentes técnicas de tratamiento de aguas residuales que han permitido disminuir la carga contaminante de las mismas para poder utilizarlas nuevamente.

En Emalahleni, Mpumalanga Sudáfrica, la empresa Anglo American realizó el proyecto de recuperación de agua con el fin de asegurar una gestión ambientalmente responsable del exceso de agua en las minas y un suministro continuo de agua tratada para actividades mineras.

La planta trata el agua de las tres operaciones de carbón térmico de Anglo American y utiliza la tecnología de desalinización. El agua de la mina se convierte en agua potable, agua de procesos/industrial y agua que puede descargarse con seguridad en el ambiente. (WWAP, 2017).

En Singapur desde 1960 se empezó a realizar reúso de aguas residuales tratadas en el sector industrial. En la década de 1960 se reusaban 90.000 m³/día de aguas residuales tratadas y desde 2003, Singapur reusa casi la totalidad de las aguas residuales tratadas en usos no potables en las industrias. (Onyango, Leslie, & Wood, 2014).

Uno de los principales proyectos desarrollados en el país es NEWater, donde el agua industrial de alta calidad es producida a partir de agua residual municipal que se purifica con tecnologías avanzadas de membrana y desinfección ultravioleta, la cual es entregada a las industrias a través de tuberías diseñadas para tal fin. (Onyango, Leslie, & Wood, 2014).

En México, la empresa Grupo Peñoles trata aguas residuales domésticas provenientes del municipio de Torreón para luego incorporarlas al proceso minero. En el año 2016 se usaron 12,4 millones de metros cúbicos, de los cuales 5,8 millones correspondían a aguas reusadas (tratadas por la empresa). (Páez Rúaless, 2018).

El tratamiento que se realiza a las aguas residuales industriales debe garantizar la eliminación o recuperación del agua en las mejores condiciones, ya que contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del mismo y al cuidado de los ecosistemas.

Uso de agua lluvia

El aprovechamiento de agua lluvia es el resultado de la alta demanda de recursos y las condiciones ambientales en cada región. Cuando no existe red de agua potable, el suministro es deficiente o el agua tiene un costo muy alto, se buscan sistemas alternativos de abastecimiento, como la recolección de aguas lluvias para suplir las necesidades de abastecimiento de la población.

Los sistemas de captación del agua de lluvia se han utilizado tradicionalmente en diferentes lugares del mundo, sin embargo, solo recientemente se han empezado a usar tecnologías, ya que su uso se está haciendo más extensivo. Países

de Latinoamérica, África y Asia están generando un fuerte desarrollo en estas prácticas.

En el Desierto de Negev en Jordania, han sido descubiertos sistemas de captación de agua de lluvia que datan de 4.000 años o más, que consisten en el desmonte de lomeríos para aumentar la escorrentía superficial, que era utilizada en predios agrícolas en las zonas más bajas. (Suárez, García, & Mosquera, 2006).

En algunos países de África el aprovechamiento de agua lluvia es de carácter informal y de bajo costo, sin embargo, la calidad del agua y la eficiencia del sistema es baja. Los sistemas formales son promovidos por agencias subsidiarias o adoptadas por familias de clase media con grandes volúmenes de almacenamiento que intenta satisfacer la demanda de las viviendas. (Suárez, García, & Mosquera, 2006).

En la India varias entidades están desarrollando programas para impulsar el uso eficiente del agua, el ahorro de agua potable, el aprovechamiento del recurso pluvial y el apoyo a nuevas tecnologías que lo permitan. Los sistemas de captación de lluvia implementados son de bajo costo e impacto y permiten aumentar las reservas de agua; razón por la cual han promulgado leyes y la recolección de fondos los Gobiernos locales para fomentar y aumentar estas técnicas. (Suárez, García, & Mosquera, 2006).

En Chile y Argentina se han implementado sistemas de recolección de aguas lluvia para actividades que no requieren agua potable; riego, inodoros, lavarropas, torres de enfriamiento, limpieza. (FAO, 2013).

3.2. Experiencias internacionales

Análisis de las experiencias de reúso de agua residual doméstica, industrial, de drenaje agrícola y uso de agua lluvia a nivel internacional.

3.2.1. Experiencias países Latinoamericanos

3.2.1.1. México

Generalidades

La República Mexicana está situada en el continente americano en el hemisferio norte; parte de su territorio se encuentra en América del Norte y el resto en América Central. Tiene una población estimada a 2019 de 125.000.000 de habitantes (INEGI, 2015) y una superficie territorial de 1.964 millones de km², de los

cuales 1.959 millones corresponden a la superficie continental y el resto a las áreas insulares (Comisión Nacional de Agua, 2018).

Se encuentra organizado como una República representativa, democrática y federal. Está dividido políticamente en 32 entidades federativas, de las cuales 31 son estados libres y soberanos en su régimen interior y un Distrito Federal donde residen los Poderes Federales.

Gráfico 3. Mapa de México



Fuente: Oficina de información diplomática, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, Ficha de país México, 2019

Disponibilidad y uso de agua

Por su ubicación geográfica, la porción sur de México se encuentra en la zona intertropical y la porción norte se localiza en la zona templada. Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500 mm, mientras que una tercera parte, el sureste, es húmedo, con precipitaciones anuales que superan los 2.000 mm por año. En la mayor parte del territorio la lluvia es más intensa en verano y principalmente de tipo torrencial. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

Anualmente México recibe aproximadamente 1.449.471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

En cuanto a los recursos hídricos del país existen aproximadamente 633 mil kilómetros de red hídrica, en la que se destacan 51 ríos principales. Según CONAGUA existen 757 cuencas hidrográficas, de las cuales 649 se encuentran en situación de disponibilidad. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

Igualmente, México cuenta con 653 acuíferos, de los cuales 105 están en condiciones de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina.

Tabla 3. Disponibilidad y usos de agua en México.

| Variable | Año | Valor | Unidad |
|--|------|-----------|--|
| Recursos hídricos | | | |
| Precipitación anual promedio | 2017 | 1.449.471 | Millones de m ³ |
| Recursos hídricos renovables totales | 2017 | 452 | Miles de millones de m ³ |
| Recursos hídricos renovables por persona | 2017 | 3.656 | m ³ /hab/año |
| Extracción de agua | | | |
| Agrícola | 2017 | 66,76 | Miles de millones de m ³ /año |
| Abastecimiento Público | 2017 | 12,65 | Miles de millones de m ³ /año |
| Industrial | 2017 | 8,43 | Miles de millones de m ³ /año |

Fuente: Adaptado de Comisión Nacional de Agua. (2018). Estadísticas del agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión. El crecimiento demográfico, la urbanización y el incremento en el consumo de agua en los hogares, la agricultura y la industria, han aumentado significativamente el uso del recurso. Por lo anterior, el agua ha sido reconocida como un asunto estratégico y de seguridad nacional, y se ha convertido en elemento central de las actuales políticas ambientales y económicas, así como un factor clave del desarrollo social. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

Producción de aguas residuales y su tratamiento

En el sexenio 2000-2006 se lograron avances importantes al incrementar el porcentaje de agua residual tratada del 23% en el año 2000 al 36.1%, al año 2006. (Peña, Ducci, & Plascencia, 2013).

En el periodo 2007-2012, el caudal de aguas residuales tratado se incrementó en 11.4%, llegando a un 47.5%, lo que representa un caudal tratado de 99.8 m³/s, con lo que se logró duplicar la cobertura del año 2000 al 2012.

Según la Comisión Nacional del Agua - (Conagua) para el año 2017 se recolectaron 215.2 m³/s de aguas residuales municipales través de los sistemas de alcantarillado. De estas se trataron 135.6 m³/s de aguas residuales en 2.526 plantas municipales, es decir el 63% de las aguas residuales recolectadas. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

En el año 2017, se generaron 218.1 m³/s de aguas residuales no municipales de las cuales se trataron 83.7 m³/s, en 3.025 plantas en operación a escala nacional.

Tabla 4. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales

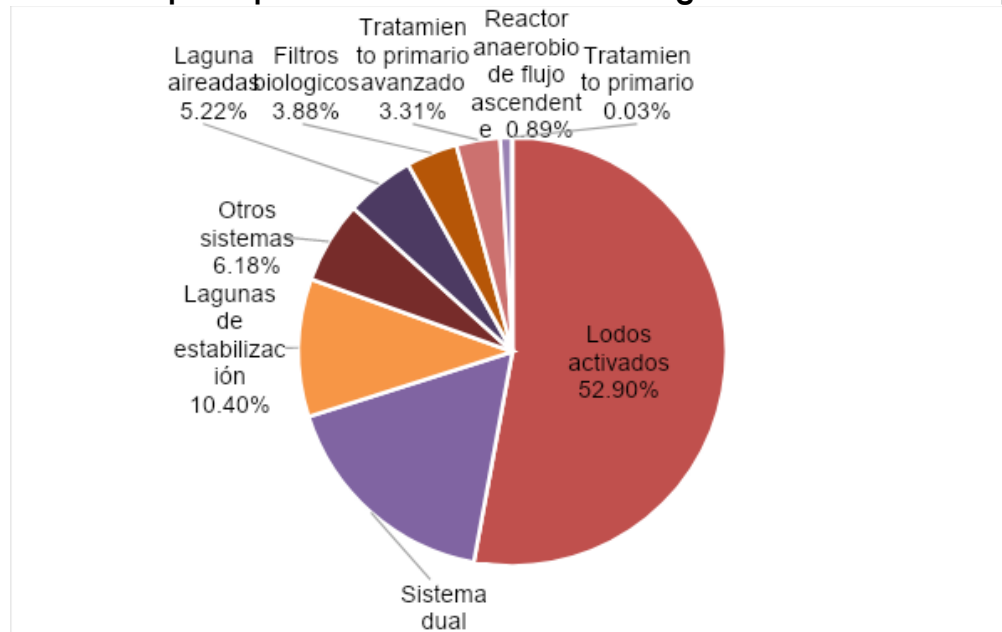
| Tipo de descarga | Volumen | Unidad |
|--|---------|---|
| Descargas municipales | | |
| Aguas residuales municipales | 7.41 | miles de hm ³ /año (234.9 m ³ /s) |
| Recolección en redes de alcantarillado | 6.79 | miles de hm ³ /año (215.2 m ³ /s) |
| Agua Tratada | 4.28 | miles de hm ³ /año (135.6 m ³ /s) |
| Descargas no municipales, incluyendo a la industria | | |
| Aguas residuales no municipales | 6.88 | miles de hm ³ /año (218.1 m ³ /s) |
| Agua Tratada | 2.64 | miles de hm ³ /año (83.7 m ³ /s) |

Fuente: Comisión Nacional de Agua. (2018). Estadísticas del agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Según CONAGUA, en 2017 se reutilizaron 118,6 m³/s de aguas residuales de las cuales directamente (antes de su descarga) se reutilizaron 39,8 m³/s e indirectamente (después de su descarga) fueron reutilizadas 78,8 m³/s de aguas residuales tratadas. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

En materia de infraestructura, México cuenta con 2.526 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Entre los sistemas de tratamiento utilizados para el tratamiento de aguas residuales municipales durante el 2017, domina el de lodos activados (52,9%) seguido por el sistema dual (17,19%), lagunas de estabilización (10,40%), otros sistemas (6,18%), lagunas aireadas (5,22%), filtros biológicos (3,88%), tratamiento primario avanzado (3,31%), reactor anaerobio de flujo ascendente 0,89% y tratamiento primario (0,03%). (Comisión Nacional de Agua, 2018).

Gráfico 4. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales



Fuente: Comisión Nacional de Agua. (2018). Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Descripción del(os) Proyecto(s)

Aunque en México no se evidencian problemas de disponibilidad de agua en función del volumen per cápita de agua, se ha venido presentando dificultades de disponibilidad en algunas regiones del país. Es por esto que el reúso de agua residual en México ha tomado gran importancia. (Arreguín Cortés, Moeller Chávez, Escalante Estrada, & Rivas Hernández, 1999).

El reúso pretende fomentar el intercambio de agua residual tratada, sustituyendo el agua de primer uso principalmente en las actividades industriales y agrícolas, impulsando así el desarrollo sostenible. En México se han realizado algunas acciones relacionadas con el aprovechamiento del agua residual tratada.

En cuanto a los principales usos del agua residual tratada se encuentra el riego agrícola que incluye las descargas a los drenes agrícolas, asequías de riego y el riego de forrajes, los usos industriales y el riego de áreas verdes. (Arreguín Cortés, Moeller Chávez, Escalante Estrada, & Rivas Hernández, 1999).

Drenaje agrícola

El agua destinada para uso agropecuario constituye el 76% del total de la extracción de agua en México. La superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales 18% eran de riego y el resto tenían régimen de temporal. (Comisión Nacional de Agua, 2018).

En la actualidad el sector agrícola es el responsable de la mayor extracción de agua dulce en el país, debido al crecimiento de la población y el creciente aumento de producción de alimentos. El aumento de la demanda de consumo de agua para este sector ha permitido generar nuevas técnicas para el suministro de agua que contempla la reutilización de aguas residuales para riego.

La mayor parte de las aguas residuales que son utilizadas para riego agrícola se usan sin algún tratamiento previo, lo cual representa un peligro para la salud humana debido a la materia orgánica e inorgánica contaminante. (Rivas-Lucero, Nevárez- Moorillón, Raúl G., Pérez- Hernandez, & Saucedo-Terán, 2003).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, sus siglas en inglés), en México el uso directo de agua tratada en la agricultura de regadío corresponde a 0.401 kilómetros cúbicos al año (70,000 hectáreas) y el uso directo de agua no tratada en agricultura de regadío corresponde a 4.33 kilómetros cúbicos al año (387,600 hectáreas), de los cuales, aproximadamente, 22 % corresponde al Valle del Mezquital. (García-Salazar, 2019).

La Tabla 5 muestra la comparación de los criterios de calidad para irrigación definidos por los estándares de Estados Unidos (según EPA, 2012), México (según NOM-001-ECOL-1996) e Israel (según norma israelí)

Tabla 5. Criterios de Calidad de agua para irrigación en EEUU, México e Israel

| Parámetro | Unidades | E.E.U.U. | México | Israel | | |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|--------|---------------------|----------------------|---------|
| | | | | Irrigación Limitada | Irrigación Ilimitada | |
| E. Coli | Unidades/100 ml | 14 | | - | 10 | |
| Coliformes fecales | Unidades/100 ml (NMP/100 ml) | | | 1000 | | |
| D.B.O. | mg/l | 10-30 | 75-150 | 20 | 10 | |
| S.S.T. | mg/l | 10-30 | 75-150 | 20 | 10 | |
| D.Q.O. | | | | 100 | 100 | |
| Nitrógeno total | | 40 | | 60 | 25 | |
| Fósforo total | | 20 | | 12 | 5 | |
| pH | | 6.0-9.0 | | | 6.5-8.5 | 6.5-8.5 |
| SAR | | 3-9 | | | 5.0 | 5.0 |
| Detergentes | | mg/l | | | 2.0 | 2.0 |
| Turbidez | NTU | 2 (con filtración + desinfección) | | | | |
| Aluminio | mg/l | 5.0 | | 5.0 | 5.0 | |
| Arsénico | | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | |
| Berilio | | 0.1 | | 0.1 | 0.1 | |

| Parámetro | Unidades | E.E.U.U. | México | Israel | |
|-----------|----------|----------|--------|---------------------|----------------------|
| | | | | Irrigación Limitada | Irrigación Ilimitada |
| Boro | | 0.75 | | 0.4 | 0.4 |
| Cadmio | | 0.01 | 0.2 | 0.01 | 0.01 |
| Cromo | | 0.1 | 1.0 | 0.1 | 0.1 |
| Cobalto | | 0.05 | | 0.05 | 0.05 |
| Cobre | | 0.2 | 4.0 | 0.2 | 0.2 |
| Fluoruro | | 1.0 | | 2.0 | 2.0 |
| Hierro | | 5.0 | | 2.0 | 2.0 |
| Plomo | | 5.0 | 0.5 | 0.1 | 0.1 |
| Litio | | 2.5 | | 2.5 | 2.5 |
| Manganeso | | 0.2 | | 0.2 | 0.2 |
| Molibdeno | | 0.01 | | 0.01 | 0.01 |
| Níquel | | 0.2 | 2.0 | 0.2 | 0.2 |
| Selenio | | 0.02 | | 0.02 | 0.02 |
| Vanadio | | 0.1 | | 0.1 | 0.1 |
| Cinc | | 2.0 | 10 | 2.0 | 2.0 |
| Sodio | | | | 150 | 150 |
| Cloruro | | | | 250 | 250 |

Fuente: Cohen, A., Mamane, H., & Lester, Y. (2015). Reutilización de Aguas Residuales en México: Caso Sonora. México: Water Research Center de la Universidad de Tel Aviv; Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

La práctica de reuso es común en las regiones áridas de México, debido a la escasez de agua que enfrentan estas poblaciones, y el país ha avanzado en la construcción de PTAR para tratar el agua que usan los agricultores.

A continuación, se presentan algunos casos de reuso de agua para drenaje agrícola en México:

Planta de tratamiento de aguas residuales de Hermosillo – Sonora

(Cooperación Alemana para el Desarrollo, 2018), (Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, 2011).

Ubicación

La ciudad de Hermosillo está ubicada en una región semiárida en el estado de Sonora, a 260 kilómetros de la frontera con Estados Unidos. Para el año 2015 la población del municipio de Hermosillo era de 812.229 habitantes.

Hermosillo es la ciudad más importante del estado de Sonora, ya que es la localidad con la mayor concentración de población, en donde se ubican los principales centros de educación superior y es el centro de la gestión comercial, industrial, agrícola y ganadera del estado.

Gráfico 5. Localización Valle de Hermosillo - Sonora, México



Fuente: Ojeda de la Cruz, A., Narváez Tijerina, A. B., & Quintana Pacheco, J. (2014). Gestión del agua doméstica urbana en Hermosillo (Sonora, México). Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, 147-164.

Los recursos hidrológicos de la ciudad son los ríos Sonora y San Miguel, que confluyen a pocos kilómetros al este de la cabecera municipal. El más importante es el Río Sonora que nace en el noreste del estado y es el único con caudal permanente. La mayor parte del estado de Sonora se localiza en una región desértica del territorio nacional que se denomina Desierto de Sonora, su desarrollo económico se ha basado principalmente en la agricultura y la ganadería.

Las principales regiones agrícolas en el estado de Sonora son el valle del Yaqui, el valle del mayo, el valle de Guaymas, la costa cerca de Hermosillo, la costa de Caborca y el valle de San Luis Río Colorado. La mayoría de los campos agrícolas se encuentran en la parte occidental del estado, junto a la zona costera. Estas áreas utilizan irrigación para producir grandes cantidades de cultivos como trigo, papas, sandía, algodón, maíz, melones, sorgo, garbanzos, uvas, alfalfa, naranjas y mucho más. Estos cultivos requieren de una gran cantidad de agua que ha generado una sobreexplotación de los recursos hídricos en el municipio, bajando drásticamente los niveles de agua, lo cual es preocupante cuando se contrastan con la baja disponibilidad de agua para la ciudad (Scott and Pineda 2011).

La situación de la ciudad de Hermosillo cuando se inició el proceso de licitación de la PTAR fue descrita en el documento “Avanzando desde la vulnerabilidad hacia la adaptación”, como se presenta a continuación:

- *“Ha habido una sobreasignación (concesión excesiva) y una extracción excesiva de derechos tanto de aguas superficiales como subterráneas en los acuíferos que rodean a la ciudad de Hermosillo. Esta sobreasignación se agrava con la proclividad de los concesionarios a extraer más agua de la que tienen concesionada.”*
- “Esta sobreasignación y la excesiva extracción de aguas superficiales aparentemente responden al período de abundancia relativa de aguas de los ochenta y principios de los noventa, pero es motivo de severa crisis en los períodos de sequía y disminución de las lluvias y los escurrimientos de agua.”
- “La sobreasignación y la excesiva extracción de aguas subterráneas aparentemente responden a conductas individuales de maximización de beneficios que afectan directamente el comportamiento conjunto de los usuarios y produce a mediano plazo el encarecimiento de los costos de extracción y el agotamiento de los acuíferos.”
- “La sobreasignación y sobreexplotación del agua de la cuenca en torno a Hermosillo afectan directamente y reduce la disponibilidad de agua para la ciudad de Hermosillo.”
- “La gestión del agua en la ciudad de Hermosillo ha estado orientada principalmente a la construcción de obras de infraestructura de gran ingeniería que aumentan el abasto de agua. Ha sido una gestión orientada a la oferta.”

Vale la pena mencionar igualmente que la ciudad no cuenta con una adecuada gestión del agua, no se realiza control de las pérdidas en la red, hay ausencia de administración de la demanda, medición, cobro con base en volúmenes de agua consumidos y sanciones a los que no pagan el servicio.

Los sectores más afectados y vulnerables a la escasez relativa de agua es la población de menores ingresos, sobre todo aquella que carece del servicio, y la población que vive en los tejidos periurbanos que han visto seriamente afectados su acceso al agua, sus actividades agropecuarias y sus modos de vida. (Wilder, Scott, Pineda-Pablos, Varady, & Garfin, 2012)

Hermosillo tiene registradas un total de 24 PTARs, las cuales tratan parte del agua generada por los usuarios no domésticos, especialmente las provenientes de comercios e industrias. Solo las plantas de FENOSA y Los Lagos tratan el influente proveniente de la red de colectores municipales, lo cual ha generado que la zona conurbada de la ciudad enfrente un nivel importante de contaminación por las aguas residuales de origen sanitario, ya que éstas son vertidas sin tratamiento

alguno en las márgenes del cauce del Río Sonora para el aprovechamiento en riego. (CONAGUA, 2012)

Por lo anterior, se planeó la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Hermosillo que solucionaría los problemas de contaminación del río Sonora y contribuiría a la solución de inconvenientes relacionados con el abastecimiento de agua para la ciudad, al llevar a cabo el proceso de intercambio de aguas de primer uso por aguas residuales tratadas para riego de sus zonas agrícolas. (CONAGUA, 2012)

En el año 2001 se creó Agua de Hermosillo como organismo público descentralizado de la administración pública municipal, con personalidad jurídica y patrimonio propio, como Organismo Operador Municipal para la prestación de los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales denominado, con una visión integral de corto, mediano y largo plazo, para ejercer las funciones de autoridad administrativa, de conformidad con las atribuciones que le confiere el Capítulo II, Sección Primera de la Ley de Agua del Estado de Sonora. (CONAGUA, 2012)

En este sentido, como se mencionó anteriormente, la ciudad de Hermosillo (Sonora), por intermedio del prestador de los servicios de agua y saneamiento denominado "Aguas de Hermosillo", suscribió un convenio con el Gobierno Estatal de Sonora a través del SAGARPHA para el reúso y administración de las aguas tratadas de la PTAR Hermosillo, con destinación a actividades agropecuarias.

En este convenio se especifican los volúmenes de agua tratados con destinación al riego (25'344.000 m³), el número de hectáreas beneficiadas (1.584), ubicados en las zonas del Distrito de Riego de la presa "Abelardo L. Rodríguez".

Con el propósito de cubrir los costos y gastos generados de la actividad de distribución del agua residual tratada, se pactó en el convenio que anualmente Aguas de Hermosillo determinará el precio del millar de metros cúbicos de agua residual tratada para uso agrícola. Este valor se encuentra pactado (en cifras de 2016) en un valor equivalente a \$4,36 dólares por millar de metro cúbico, el cual debe ser pagado por cada usuario directamente en las oficinas de la SAGARHPA.

La Planta de tratamiento fue gestionada entre el Municipio de Hermosillo y Agua de Hermosillo, quienes mediante licitación pública contrataron el diseño, construcción, operación y transferencia de la infraestructura de saneamiento con la empresa denominada TIAR Hermosillo, S.A.P.I. de C.V con un período autorizado de operación de 19 años. El proyecto contó con la Validación técnica y financiera

de CONAGUA y BANOBRAS, y el resolutivo de impacto ambiental¹⁴ de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

La construcción de las obras se llevó a cabo conforme a los lineamientos establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para la construcción de este tipo de obras. Adicionalmente, las obras realizadas no afectaron áreas protegidas o reservas ecológicas puesto que se desarrolló en una zona rural ya impactada.

Durante la implementación del proyecto, Agua de Hermosillo y CONAGUA realizaron la supervisión de las obras, de manera complementaria a la supervisión externa que fue contratada. La planta inició operación en diciembre de 2016.

Aspectos Técnicos

La planta fue diseñada para tratar 2500 l/s, y alcanza una cobertura del 100% del volumen de aguas residuales generadas en el municipio.

El sistema de tratamiento propuesto para la PTAR da cumplimiento a lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001- SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-004-SEMARNAT-2002. Específicamente, la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los parámetros para el uso del público con contacto directo, 20 mg/l de SST y de 20 mg/l de DBO en su efluente, con el fin de que pueda ser utilizada para el riego agrícola, recargas de acuífero y usos urbanos.

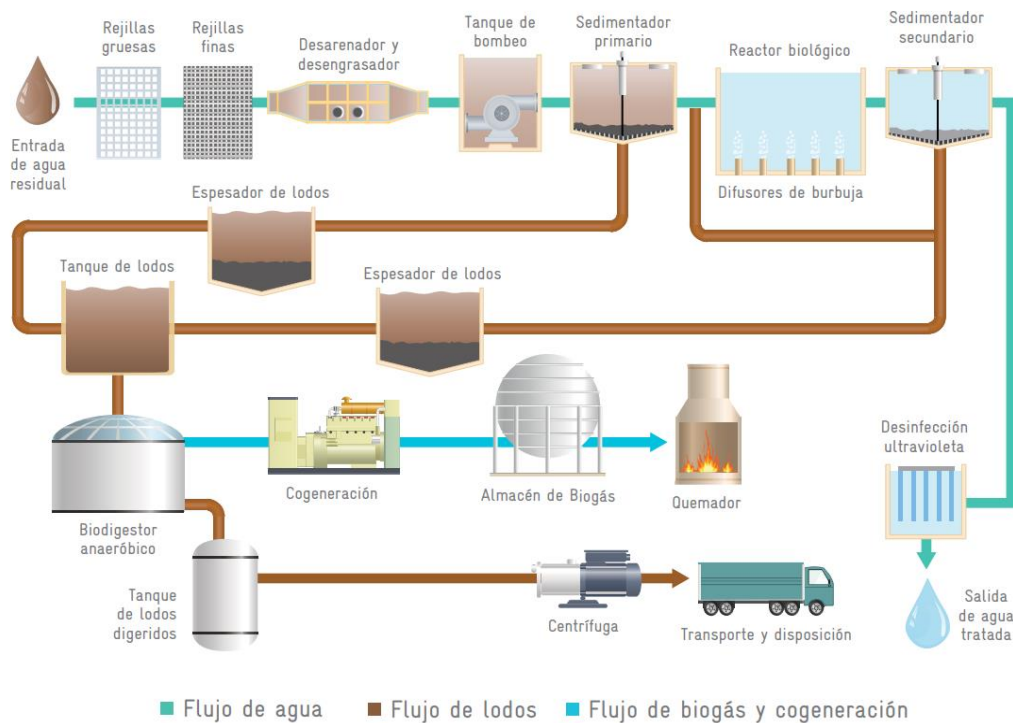
Tipo de proceso: La planta cuenta con un tratamiento preliminar, un desbaste grueso y fino, así como desengrasado y desarenado; un sistema de bombeo de agua sin tratar y un tratamiento primario en sedimentadores.

Posteriormente, el agua residual pasa al tratamiento secundario en reactores biológicos y después a sedimentadores secundarios para pasar al sistema final de desinfección con luz ultravioleta y a la Estación de bombeo de agua tratada.

Se realiza también el Manejo de lodos subproducto del tratamiento que consiste en el sistema de extracción y almacenamiento de lodos, el tratamiento biológico de lodos, el deshidratado de lodos, el espesamiento de lodos, el tratamiento y estabilización mediante digestión anaerobia con generación de biogás y la disposición final de lodos.

¹⁴ **Resolutivo de impacto Ambiental:** Autorización para llevar adelante la gestión de un proyecto, la cual se obtenido a partir del documento de evaluación de impacto ambiental – EIA.

Gráfico 6. Diagrama PTAR Hermosillo - Sonora



Fuente: Cooperación Alemana para el Desarrollo. (2018). Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México. México: Secretaría de Energía (SENER), Dirección General de Energías Limpias, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Adicionalmente, el proyecto incluyó la ampliación del Emisor General con 2.3 kilómetros de longitud y 2.44 metros de diámetro, para conducir el agua residual hasta la planta de tratamiento, así como dos estaciones de bombeo, una estación de bombeo de agua cruda y otra de agua tratada, para la distribución de esta hacia los distintos sitios de reúso.

Volumen tratado: 78.8 millones de m³/año

Uso del agua residual tratada: Agua de Hermosillo adelantó un convenio de coordinación con el Gobierno del Estado de Sonora a través de la secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura (denominado SAGARHPA) que establece las bases y mecanismos de coordinación y cooperación entre las partes, para el reúso y administración de las aguas tratadas provenientes de la Planta de tratamiento de aguas residuales de Hermosillo para que sean aprovechadas en actividades agropecuarias por usuarios del Distrito de Riego de la Presa " Abelardo L. Rodríguez"

El agua residual tratada es utilizada para el riego agrícola y se suministran 100 Lps, en promedio, a una laguna recreativa ubicada al noroeste de la planta, misma

que forma parte del proyecto municipal denominado Parque Metropolitano. Se contempla utilizar parte del caudal del agua tratada en recargas de acuíferos y usos urbanos.

Uso agrícola: 45.34 millones de m³/año

Uso recreativo (Parque Metropolitano): 6 millones de m³/año

Otros usos: 27.5 millones de m³/año (recarga de acuífero, industria, usos urbanos, etcétera)

Según la información disponible, el agua residual que era usada por los agricultores era no segura y con el tratamiento recibido mejoró su calidad.

Aspectos financieros

El proyecto tuvo un costo de 56 millones de Dólares. El 56% de dicha inversión se obtuvo a través de créditos del BDAN y del Banco del Bajío, el 22% con un subsidio del Fondo Nacional de Infraestructura (Fonadin) y el 22% restante fue aportado por la empresa Tiar Hermosillo como capital de riesgo.

Dificultades y Retos

Aunque la PTAR estaba concebida para distribuir el agua tratada para diferentes usos, se han presentado quejas tanto del operador como de sectores potencialmente receptores del agua tratada desde que inició la operación de la planta.

Los principales problemas están relacionados con la incapacidad del operador de realizar la venta total del agua tratada, ya que en un porcentaje importante se descarga a la fuente de agua receptora sin haberse utilizado nuevamente. Asimismo, los ejidatarios de algunas zonas manifiestan no tener acceso a la cantidad suficiente de agua tratada, pero tampoco al agua cruda, ya que esta es canalizada hacia la PTAR.

Planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco, Hidalgo (García-Salazar 2019). (Atienzar España, 2020)

Ubicación

El valle del Mezquital se localiza en la parte suroccidental del estado de Hidalgo, al norte del Valle de México (Ver Gráfico 7). Es una de las diez regiones que dividen al estado de Hidalgo en México. Tiene aproximadamente 450.000

habitantes en 294 comunidades rurales. Una característica esencial del Valle es su clima semiárido y su baja precipitación pluvial. (BID, 2015).

La ganadería y la agricultura son las principales actividades económicas. (Pérez, Jiménez, Jiménez, & Chávez, S.f). Los principales productos cultivados en el Valle corresponden a maíz grano, alfalfa verde, frijol, avena forrajera en verde, calabacita, tomate verde, tomate rojo, maíz forrajero y cilantro.

Gráfico 7. Localización Valle del Mezquital Hidalgo, México



*Ilegibilidad de origen.

Fuente: García-Salazar, E. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, Volumen 29, Número 54. Julio - diciembre 2019, 34 páginas.

Debido a las características del suelo del valle, se necesitan grandes volúmenes de agua de regadío para la agricultura de entre 15.000 y 22.000 m³/ha/año. Por esto se empezó a utilizar aguas residuales no tratadas para el riego de los cultivos. (BID, 2015).

En Hidalgo, existen cinco distritos de riego: 003 Tula, 008 Metztlán, 028 Tulancingo, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba. El volumen de agua distribuido, a través de los distritos es de 1.513.395,4 miles de metros cúbicos al año, de los cuales el 97 % corresponde a los distritos de Tula, Alfajayucan y Ajacuba. (García-Salazar, 2019).

Se caracteriza por ser uno de los casos más estudiados en el uso de aguas residuales en México para la agricultura, ya que es la zona regada con agua residual más extensa del mundo, con más de 90.000 ha. (FAO, 2013).

El reúso de aguas residuales para riego en este valle inició en 1912 y es el mayor y más antiguo ejemplo de irrigación agrícola usando aguas residuales municipales en el mundo. (García-Salazar, 2019).

Estas aguas residuales provienen del área metropolitana la ciudad de México, las cuales fluyen por gravedad hacia el valle de Tula en el estado de Hidalgo, desde donde son transportadas y distribuidas al valle del mezquital por una amplia red de canales y presas, usando un sistema de riego por gravedad, mediante surcos o melgas. (FAO, 2013). Las aguas residuales que llegan al Valle tienen una alta carga contaminante compuesta por material orgánico, algunos metales, bacterias y detergentes.

Actualmente, el Valle del Mezquital (VM) es conocido como la segunda región en el mundo con el mayor uso de aguas residuales en el sector agrícola, así como la cloaca más grande del país por la cantidad de agua que recibe sin tratamiento.

Unas de las estrategias para minimizar el uso del agua residual sin tratamiento en el Valle fue la construcción de la PTAR Atotonilco de Tula¹⁵, la cual fue clasificada como la cuarta más grande del mundo.

Se localiza en la localidad de Conejos del municipio de Atotonilco de Tula entre las localidades de San José Acoculco y Melchor Ocampo (El Salto), municipio de Tepeji del Rio, en el estado de Hidalgo y forma parte del Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México. (García-Salazar, 2019).

La PTAR es una de las piezas fundamentales del proyecto oficial de salubridad del Valle de México formalizado en el 2007 por el Gobierno Federal (a través de CONAGUA), que planea la construcción de un número de proyectos enfocados a asegurar el abastecimiento, distribución y tratamiento de aguas en la región. El objetivo principal del programa es mejorar la calidad de las aguas residuales generadas por la ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México), para uso agrícola en el Valle de México y los distritos agrícolas circundantes cuya población vive y trabaja en el área de influencia y mejorar las condiciones ambientales del Valle de Mezquital.

El programa apuntó a reducir la extracción excesiva de agua de los acuíferos cercanos, desarrollar nuevas fuentes de agua potable (al mismo tiempo que se rehabilitan fuentes existentes), aumentar la capacidad de los sistemas de desagüe para evitar la recurrencia de inundaciones en la ZMVM, tratar las aguas residuales y promover los esfuerzos individuales de preservación de agua¹⁶.

¹⁵ Tomado de Revista Agua y Saneamiento Año 16. Numero 71 mar/abr. 2017. Beneficios y características de la PTAR de Atotonilco. Pgs 34 a 39. <http://www.aderasa.org/v1/wp-content/uploads/2017/10/AyS-71-11-ABR.pdf>

¹⁶ Panta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco México. Zofnass Program for Sustainable Infrastructure. Graduate School of Design Harvard University Jessica Bello. Tomado de https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2016/08/05_Atotonilco_SP_FinalDocument.pdf

El gobierno federal en 2009, por medio de CONAGUA adjudicó el contrato para el diseño, construcción, operación y mantenimiento, durante 22 años, al consorcio Aguas Tratadas del Valle de México. (CONAGUA, 2012).¹⁷

El Proyecto además de la participación pública de CONAGUA, contó con participación del señalado consorcio y otros actores privados ((Impulsora de Desarrollo y Empleo de Latinoamérica –IDEAL-, Dycusa y Pioneer Energy Holdings).

La construcción de la planta comenzó en el año 2010 con fecha estipulada de terminación en 2013 e inicio de operaciones en 2015. (CONAGUA, 2012).

Sin embargo, la planta se encuentra en funcionamiento desde 2017, durante este tiempo, se ha tratado un caudal medio de 31,5 m³/s, cumpliendo con todos los estándares de calidad exigidos.

Aspectos técnicos

La PTAR se construye en una superficie de 158,51 hectáreas del Municipio de Atotonilco de Tula Estado de Hidalgo, que permite sanear cerca del 60% de las aguas residuales que se generan en el Valle de México. Dentro de los criterios generales de diseño, se desarrolló para contar con una capacidad promedio total de treinta y cinco metros cúbicos por segundo (35 m³/s); 23 m³/seg mediante un Tren de Procesos convencionales (TPC) durante estiaje y en épocas de lluvia puede subir en 12 m³/s más con un Tren de Procesos Químicos (TPC). Hidráulicamente puede alcanzar puntas de 50 m³/s.

El efluente tratado del TPC se descarga al Canal El Salto–Tlamaco, donde es aprovechado para riego agrícola en el Distrito de Riego 03 y, eventualmente, al río Tula. La EDAR de Atotonilco además de depurar las aguas residuales de 12,6 millones de habitantes equivalentes de la Ciudad de México, es reutilizada para usos agrícolas o riegos tecnificados, con lo cual ha posibilitado el cambio de cultivos restringidos a no restringidos, entre otras ventajas. Adicionalmente ha traído beneficios medioambientales para la región como el saneamiento de los cauces del río Tula y la restauración ecológica de la prensa Endhó.¹⁸

La planta cuenta con dos procesos principales (SEMARNAT, 2011):

¹⁷ Consorcio integrado por Ideal (61%) a cargo de la obra civil, Acciona (24,5%) y Atlatec (24,5%) Socios tecnológicos.

¹⁸ La EDAR de Atotonilco (México), la mayor planta de tratamiento de aguas residuales del mundo cumple un año desde su puesta en marcha. Tomado de <https://www.acciona-agua.com/es/salaprensa/a-fondo/2018/julio/la-edar-de-atotonilco-m%C3%A9xico-la-mayor-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-del-mundo-cumple-un-a%C3%B1o-desde-su-puesta-en-marcha/>

- **Tratamiento Biológico:** Utiliza oxígeno para que las bacterias se reproduzcan y limpien el agua residual.
- **Tratamiento físico- químico:** Requiere de la aplicación de sustancias químicas para remover contaminantes presentes en el agua.

A partir de estos procesos la PTAR cuenta con dos trenes de tratamiento, un tren de tratamiento biológico denominado Tren de Procesos Convencionales (TPC) y un Tren de Procesos Químicos (TPQ). (ver Tabla 6)

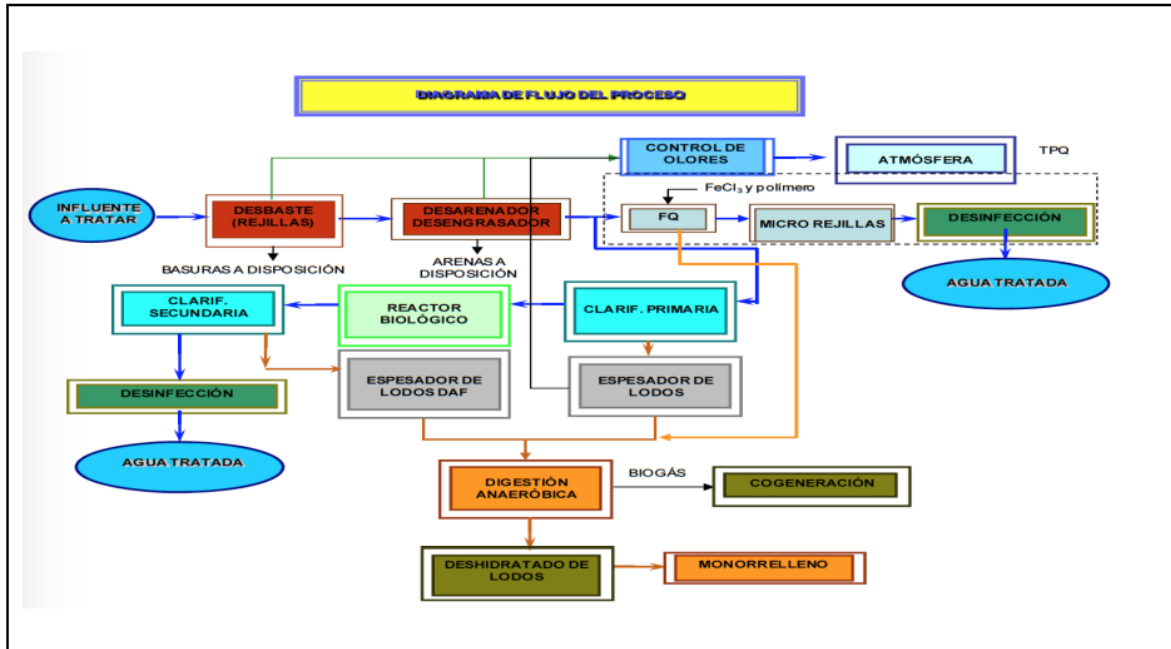
Tabla 6. Etapas del Proceso de la PTAR

| Tipo de proceso | Etapas | Descripción |
|--|---|---|
| TPC- Tren de Proceso Convencional | Clarificación primaria | En este proceso se extraen las partículas que se depositan rápidamente en el fondo de los tanques como grava y arena |
| | Tratamiento biológico | Se trata de los tanques de sedimentación, donde se separan las partículas pesadas que se depositan en el fondo a medida que el agua va ingresando |
| | Clarificación secundaria | Consiste en inyectar oxígeno al tanque para que las bacterias y otros microorganismos transformen a los contaminantes en compuestos inofensivos |
| | Desinfección | Es la Etapa final del tratamiento y se utiliza cloro para eliminar a los microorganismos que pueden provocar enfermedades |
| | Obra de descarga | El agua tratada desemboca en la presa Endhó |
| TPQ- Tren de Proceso Químico | Proceso fisicoquímico para la sedimentación lamelar | |
| | Sedimentación lamelar-espesador | |
| | Fisicoquímico para los filtros de malla | |
| | Filtración mediante filtros de malla rotativos | |
| | Desinfección mediante cloro gas | |
| | Descarga del agua | |
| Tratamiento de lodos | Espesamiento | Eliminar el agua por gravedad o por flotación |
| | Digestores | Los digestores permiten que los microbios descompongan la materia orgánica y generen dióxido de carbono y gas metano |
| | Deshidratación | Es el proceso mecánico que elimina el agua de los lodos y los transforma de una condición líquida a sólido |
| | Descarga de lodos | Los lodos se depositan en un mono relleno |

Fuente: Adaptado de CONAGUA. (2012). Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco - Memoria Documental. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.

El Gráfico 8 muestra el diagrama de flujo correspondiente al tratamiento de las aguas residuales:

Gráfico 8. Diagrama de Flujo para descripción de tratamiento de las aguas residuales



Fuente: Bello, J. (2016). Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco, México. Mexico: Zofnass Program for Sustainable Infrastructure. Harvard Graduate School of Design.

El agua residual que desemboca en Hidalgo se encauza hacia la planta de tratamiento para comenzar su tratamiento a través de las diversas etapas del TPC-Tren de Proceso Convencional. Posterior a estos procesos el agua tratada de este proceso se envía a los canales de riego y el excedente desemboca en la presa Endhó.

En temporada de lluvias cuando aumenta la cantidad de aguas residuales que llega al valle de Mezquital, se contempló un módulo adicional de tratamiento de 12 m³/s del TPQ- Tren de Proceso Químico. El procedimiento es similar al que se lleva a cabo en los primeros tres pasos del TPC, solamente que luego de la sedimentación se añaden sustancias químicas al agua para acelerar el depósito del material orgánico en el fondo del tanque para su eliminación en forma de lodo. Después de este proceso el agua entra al proceso de desinfección.

Los lodos también reciben un proceso de tratamiento para poder regresarlos sin algún peligro.

El agua tratada tiene previstos dos destinos (FuturENVIRO, 2015):

- a) El Canal Salto-Tlamaco para riego agrícola que alimenta directamente las zonas del riego del Valle del Mezquital
- b) El río Tula de cuyo cauce se derivan algunos canales de riego, en particular el Canal Viejo Requena.
- c) La principal Norma que se cumple es la NOM-001-SERMANT 1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. La calidad del agua influente considerada en las bases de diseño para los principales parámetros, así como la calidad prevista para el agua tratada se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Calidad del agua influente, efluente y % de remoción

| Parámetro | Unidad | Influente | | Efluente | | Remoción (%) |
|--------------------------|------------|------------|-------------|----------|--------|--------------|
| | | Época seca | Lluvia | TPC | TPQ | |
| Materia Orgánica (DBO) | Mg/L | 250 | 200 | 30-35 | - | 83-88 % |
| Materia Suspensión (SST) | Mg/L | 250 | 400 | 40-70 | 45 -75 | 83 -84% |
| Coliformes Fecales | Nmp/100 MI | 20.000.000 | 100.000.000 | 1.000 | 1.000 | 99% |

Fuente: FuturENVIRO. (2015). PTAR Atotonilco (México D.F.). FuturENVIRO - Proyectos, tecnología y actualidad medioambiental, 16 Páginas.

Los resultados encontrados durante la operación con respecto a la calidad del agua del influente a la PTAR para su tratamiento son los señalados en la Tabla 8 y Tabla 9, los cuales fueron suministrados por la empresa Acciona Agua.

Tabla 8. Características del agua residual cruda a ser tratada

| Parámetros | Unidad | Estiaje | Lluvia |
|--------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| | | Promedio Estacional | Promedio Estacional |
| Temperatura | 0C | 19 | 21 |
| Potencial Hidrógeno | U pH | 6.5-8.5 | 6.5-8.5 |
| Alcalinidad total | mg/L CaCO ₃ | 441 | 345 |
| SST | mg/L | 250 | 400 |
| SSV | mg/L | 150 | 250 |
| DBO ₅ total | mg/L | 250 | 200 |
| DBO ₅ soluble | mg/L | 140 | 120 |
| Nitrógeno Kjeldahl total | mg/L | 40 | 25 |
| Nitrógeno amoniacal | mg/L | 28 | 17 |

| Parámetros | Unidad | Estiaje | Lluvia |
|-------------------------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| | | Promedio Estacional | Promedio Estacional |
| Nitratos más Nitritos como N | mg/L | 0.15 | <0.15 |
| Sulfatos | mg/L | 110 | 100 |
| Fósforo total | mg/L | 12 | 9 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 90 | 35 |
| Sulfuros | mg/L | 10 | 5 |
| Coliformes Fecales | NMP/100ml | 2.00 E+07 | 1.0 E+08 |
| Huevos de Helminto | H/L | 4 | 7 |

Fuente: Cuestionario realizado empresa Acciona Agua – 5 de febrero

Tabla 9. Concentración De Metales Pesados Y Cianuro en el Agua Residual a ser tratada En La Ptar Atotonilco

| Parámetros | Unidad | Promedio Estacional |
|-----------------|--------|---------------------|
| Arsénico | mg/L | 0.0016 |
| Cadmio | mg/L | 0.024 |
| Cianuros | mg/L | 0.038 |
| Cobre | mg/L | 0.070 |
| Cromo | mg/L | 0.140 |
| Mercurio | mg/L | 0.001 |
| Níquel | mg/L | 0.060 |

Fuente: Cuestionario realizado empresa Acciona Agua – 5 de febrero

Los límites máximos permisibles en el efluente tratado para el TPC y para el TPQ, son los especificados en las Tabla 10 y Tabla 11.

Tabla 10. Los límites máximos permisibles en el efluente tratado para el TPC

| Parámetros | Unidad | Promedio Mensual | Periodo Estiaje | Periodo Lluvia |
|------------------------------|----------------|----------------------------|-----------------|----------------|
| Temperatura | Grados Celsius | Condiciones Naturales +1.5 | | |
| Potencial Hidrógeno | Unidades de pH | 5-10 | | |
| Grasas y Aceites | mg/L | 15 | | |
| Materia Flotante | | Ausente | | |
| Sólidos Sedimentables | ml/L | 1 | | |
| SST | mg/L | | 40 | |
| SST | mg/L | | | 70 |

| Parámetros | Unidad | Promedio Mensual | Periodo Estiaje | Periodo Lluvia |
|------------------------|------------|------------------|-----------------|----------------|
| DBO ₅ total | mg/L | | 30 | |
| DBO ₅ total | mg/L | | | 35 |
| Coliformes Fecales | NMP/100 ml | 1000 | | |
| Huevos de Helminto | H/L | 1.0 | | |
| Cloro Residual* | mg/L | 0.5 | | |
| Arsénico Total | mg/L | 0.2 | | |
| Cadmio Total | mg/L | 0.05 | | |
| Cianuros Total | mg/L | 2.0 | | |
| Cobre Total | mg/L | 4.0 | | |
| Cromo Total | mg/L | 0.5 | | |
| Mercurio Total | mg/L | 0.005 | | |
| Níquel Total | mg/L | 2 | | |
| Plomo Total | mg/L | 0.5 | | |
| Zinc Total | mg/L | 10 | | |

Fuente: Cuestionario realizado empresa Acciona Agua – 5 de febrero

Tabla 11. Los límites máximos permisibles en el efluente tratado para el TPC

| Parámetros | Unidad | Estiaje | Lluvia |
|-----------------------|----------------|----------------------------|----------------------------|
| | | Promedio Mensual | Promedio Mensual |
| Temperatura | Grados Celsius | Condiciones naturales +1.5 | Condiciones naturales +1.5 |
| Potencial Hidrógeno | Unidades de pH | 5-10 | 5-10 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 15 | 15 |
| Materia Flotante | | Ausente | Ausente |
| Sólidos Sedimentables | ml/L | 1 | 1 |
| SST | mg/L | 45 | 75 |
| Coliformes Fecales | NMP/100 ml | 1000 | 1000 |
| Huevos de Helminto | H/L | 1.0 | 1.0 |
| Cloro Residual | mg/L | 0.5 | 0.5 |

Fuente: Cuestionario realizado empresa Acciona Agua – 5 de febrero

Aspectos Financieros

La inversión en la construcción de la PTAR Atotonilco fue de 469.450.000 USD¹⁹, con un aporte público de 48,98 % y privado del 51,02 %.

Del aporte público, el 20% fue cubierto por la empresa Aguas Tratadas del Valle de México, el 48.9% por el apoyo financiero del Fonadin y el 31.02% restante,

¹⁹ Tomado de Proyecto diseño, construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de la planta tratadora de aguas residuales Atotonilco en Hidalgo. sector: agua y medio ambiente – Proyectos México – Oportunidades de Inversión. https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/ptar-atotonilco/

por créditos bancarios provistos por Banobras, Banorte, Banamex, Santander y Scotiabank.

Actualmente según lo informado por Antonio Atienzar España, Director General de Acciona Agua, el valor con relación a los costos de operación asciende a 1,0182 pesos /m³ tratado equivalentes a 0,0542 dólares/ m³ de agua tratada.

Dificultades y retos

Desde el punto de vista técnico las dificultades de los ejecutores del Proyecto, fue poder cumplir con los plazos para un megaproyecto de esas características del cual no existían referencias similares.

Con la construcción de la PTAR, la Comisión Nacional de Agua intenta mejorar la calidad de vida de la población del valle de Mezquital, mejorar los cordones ambientales de la región, dotar a los distritos de riego de caudales tratados con la calidad necesaria para el riego de los cultivos sin ninguna restricción y reducir los costos de las enfermedades causadas por el uso y contacto con las aguas residuales. (García-Salazar, 2019).

Sin embargo, la construcción de la PTAR ha generado grandes controversias entre los agricultores, ya que consideran que el tratamiento del agua residual les implica el aumento de las tarifas por el agua que utilizan, reducción del volumen de agua que reciben, disminución de los nutrientes en los cultivos derivados del tratamiento que los llevará a invertir en fertilizantes, así como problemas por la pérdida de cosechas. (FAO, 2013).

Debido a estos problemas, los agricultores están pidiendo que les lleguen las aguas residuales sin tratar. (Acciona Agua, 2018). Para ello, desde el año 2019 CONAGUA y los agricultores han realizado diferentes mesas de trabajo para llegar a un acuerdo en el tratamiento de las aguas residuales.

Reúso Industrial

El agua destinada para uso industrial representa solo el 10% del total de la extracción, sin embargo, es uno de los sectores que genera la mayor contaminación en Demanda Bioquímica de Oxígeno. Según CONAGUA, se generan 10.32 millones de toneladas de DBO₅ al año, de las cuales solo se remueven 1.75 a través de los sistemas de tratamiento.

En materia de desarrollo de infraestructura de tratamiento, según CONAGUA, para el año 2017 México cuenta con 3.025 plantas de tratamiento de aguas

residuales industriales en operación a escala nacional. Los principales procesos de tratamiento en estas plantas se encuentran descritos en la siguiente tabla.

Tabla 12. Tipos de tratamiento de aguas residuales industriales

| Tipo de tratamiento | Propósito | Número de plantas | Gasto de operación (m ³ /s) | Porcentaje |
|------------------------|---|-------------------|--|-------------|
| Primario | Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm. | 951 | 23,60 | 28,2% |
| Secundario | Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos | 1 833 | 55,08 | 65,8% |
| Terciario | Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus. | 91 | 2,82 | 3,4% |
| No especificado | | 150 | 2,18 | 2,6% |
| Total | | 3.025 | 83,69 | 100% |

Fuente: Comisión Nacional de Agua. (2018). Estadísticas del agua en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

A continuación, se presentan dos técnicas de reúso de agua para uso industrial en México:

Planta de tratamiento de aguas residuales de Lerdo – Durango

(Comisión Nacional del Agua, 2017)

Ubicación

Ciudad Lerdo se ubica en el estado mexicano de Durango a 249 km de la capital del estado en una región semiárida.

Entre las principales actividades económicas se encuentra la agricultura, principalmente cultivos el maíz, la avena forrajera y la alfalfa.

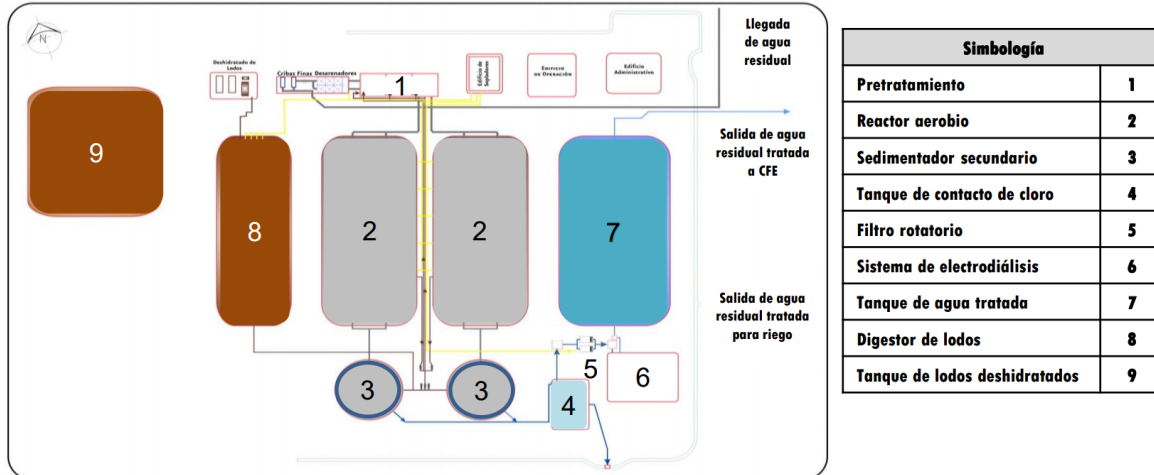
El río Nazas es la fuente principal de abastecimiento de la región, puesto que su cauce sirve para regar grandes extensiones de tierras de cultivo que hacen posible una gran producción agrícola, sin embargo, presenta problemas de sequía la mayor parte del año. Existen otros recursos, como el río Aguanaval y la presa Francisco Zarco.

La construcción de la planta de tratamiento tenía como propósito evitar que las aguas residuales generadas en la ciudad de Lerdo sean vertidas sin tratamiento, además de mejorar la calidad de agua que es conducida a los cuerpos de agua receptores, lo cual favorece igualmente la calidad del agua usada en las zonas de riego y la reutilización de agua en la industria termoeléctrica. La operación de la planta está a cargo de la Administración Municipal.

Aspectos técnicos

La planta inició operación en el año 2010, con una capacidad de tratamiento de 300 Lps.

Gráfico 9. PTAR Lerdo - Durango



Fuente: Comisión Nacional del Agua. (2017). Situación del Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en México. México: SEMARNAT - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Tipo de proceso: Lodos activados convencional y tratamiento terciario para cumplir con la calidad del agua residual tratada requerida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

La calidad del agua tratada presenta DBO5 de 75 mg/L. SST de 75 mg/L y SS de 1 mg/L.

Caudal de agua residual tratada para reúso: 180 Lps.

Uso del agua residual tratada: Una vez efectuado el tratamiento del agua, se suministra a la Central Termoeléctrica Guadalupe Victoria de la Compañía Federal de Electricidad de Ciudad Juárez, Durango, convirtiéndose esta central en la única fuente de pago del proyecto.

Mediante esta planta se deja de extraer agua de primer uso de 7 pozos profundos para la Central Termoeléctrica "Guadalupe Victoria" y se empieza a usar agua proveniente de la PTAR.

Aspectos financieros

La PTAR tuvo una inversión aproximada de 17 millones de dólares para la realización del proyecto y obras complementarias de drenaje en la ciudad y comunidades rurales.

Planta de tratamiento de aguas residuales Cd. Madero, Estado de Tamaulipas (Orduz Aguilar, 2019)

A través de un convenio suscrito entre PEMEX Refinería Madero y la COMAPA (Organismo Operador de Aguas de Tampico), TICSA, filial del Grupo EPM, es la encargada de realizar y operar las obras para dotar de agua residual tratada a PEMEX Refinación de Ciudad Madero. La PTAR ubicada en el municipio de Ciudad Madero trata agua residual de los municipios de Altamira y Tampico.

Es uno de los proyectos más importantes en materia de reúso de agua para México y para el Grupo EPM, ya que a partir de este se puede seguir trabajando en pro de la sostenibilidad a través de la generación de nuevos proyectos de reúso.

En la industria de refinación y petroquímica, la separación de los componentes del petróleo se efectúa por diversos procesos a elevadas temperaturas. Para disminuir la temperatura de las corrientes se cuenta con torres de enfriamiento que se deben abastecer continuamente con agua de calidad.

Por ello, Pemex Refinación planteó un esquema donde se considera que el agua residual de las ciudades de Tampico y Madero sea una fuente potencial de suministro de agua que, propiamente tratada, se puede reusar para mitigar las demandas de agua de primer uso en las torres de enfriamiento de la refinería.

La Refinería Francisco Madero se encuentra localizada en el margen izquierdo del Río Pánuco, casi en su desembocadura al Golfo de México, dentro del municipio de Ciudad Madero, Tamaulipas, de cuya región está tomado su nombre. Con este proyecto PEMEX busca prevenir y controlar la contaminación del ambiente, preservar los recursos naturales, y racionalizar cada vez más el uso del agua, ordenando la integración al entorno de sus centros de trabajo.

Aspectos técnicos

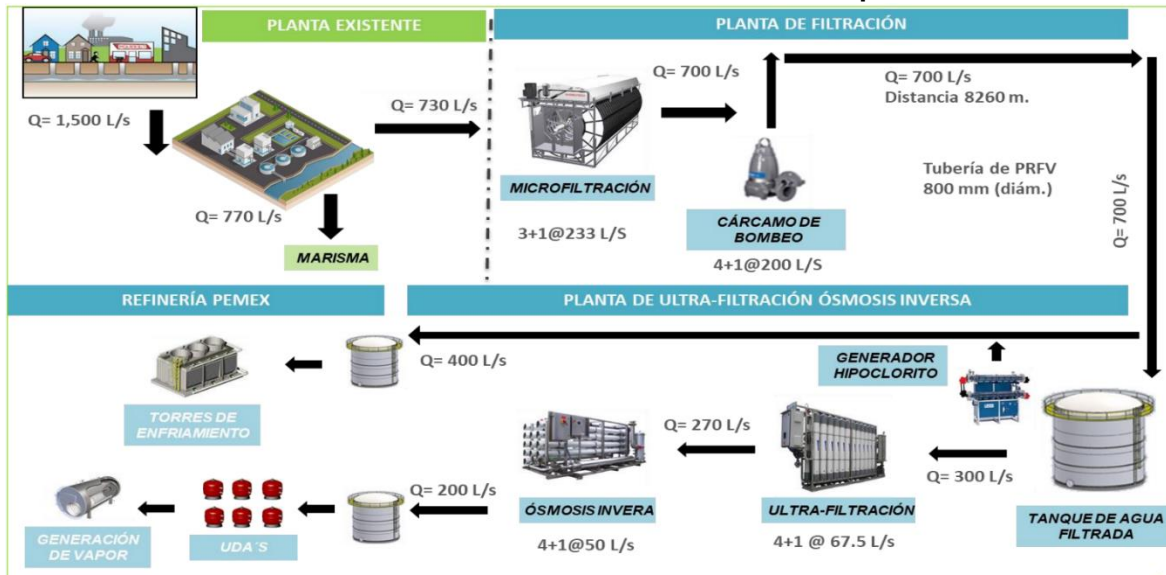
La planta de tratamiento de aguas residuales del municipio es de tipo modular y está diseñada para un gasto promedio de diseño de 1.2 m³/s, con una capacidad de tratamiento para tratar 1.500 Lps.

El proyecto de TICSA consiste en llevar 600 litros por segundo de agua residual adicional desde el emisor Guatemala a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Tierra Negra.

Tipo de proceso: El agua residual recibirá un tratamiento biológico y, posteriormente, el agua filtrada será enviada a PEMEX por medio de un ducto de 12 kilómetros de longitud.

Dentro de las instalaciones de PEMEX se encuentra otra planta de tratamiento, en la que se realizan los procesos de ultrafiltración y osmosis inversa. Con esto PEMEX recibe 400 litros por segundo de agua filtrada para emplearse en torres de enfriamiento y 200 litros por segundo de agua de osmosis inversa para las calderas.

Gráfico 10. PTAR Cd. Madero - Tamaulipas



Fuente: Orduz Aguilar, C. (2019). Reuso de agua municipal en la industria petrolera, un caso de éxito de economía circular: TICSA Grupo EPM – COMAPA - PEMEX. México: TICSA Grupo EPM.

Uso del agua residual tratada: Torres de enfriamiento y UDAS calderas refinería PEMEX.

Aspectos financieros: La inversión para la construcción de la planta fue de 45 millones de dólares.

Aspectos Institucionales²⁰²¹

De acuerdo con el ordenamiento jurídico, cada estado es responsable de expedir sus propias leyes, por lo cual se cuenta con leyes estatales en 31 estados.

A nivel estatal, los gobiernos estatales tienen responsabilidades de planeación, regulación, desarrollo de infraestructura hidráulica y en ciertos casos de suministro de agua y saneamiento en cooperación con municipios o a beneficio de estos. A nivel municipal, de acuerdo con la ley de creación de la administración directa de obras y servicios de agua potable y alcantarillado, los municipios se

²⁰ CEPAL (mayo 2014) Serie Recursos Naturales e Infraestructura No.166, Políticas e institucionalidad en materia de agua potable, ISSN 1680-9017.

²¹ CONAGUA (2018), Estadísticas del Agua en México

encargan de planear, programar, estudiar, proyectar, presupuestar, construir, supervisar, ampliar y operar tanto los sistemas de potabilización, conducción y distribución de agua potable como los sistemas de alcantarillado, pluviales tratamiento y reúso de aguas residuales.

La prestación de los servicios en zonas urbanas está a cargo de los municipios mediante lo que se denomina "organismos operadores", los cuales en su mayoría son entidades públicas descentralizadas de la administración municipal, salvo que exista un contrato de concesión. Sin embargo, en muchos casos, especialmente en ciudades intermedias, los municipios prestan los servicios en forma directa a través de juntas de agua y saneamiento municipales.

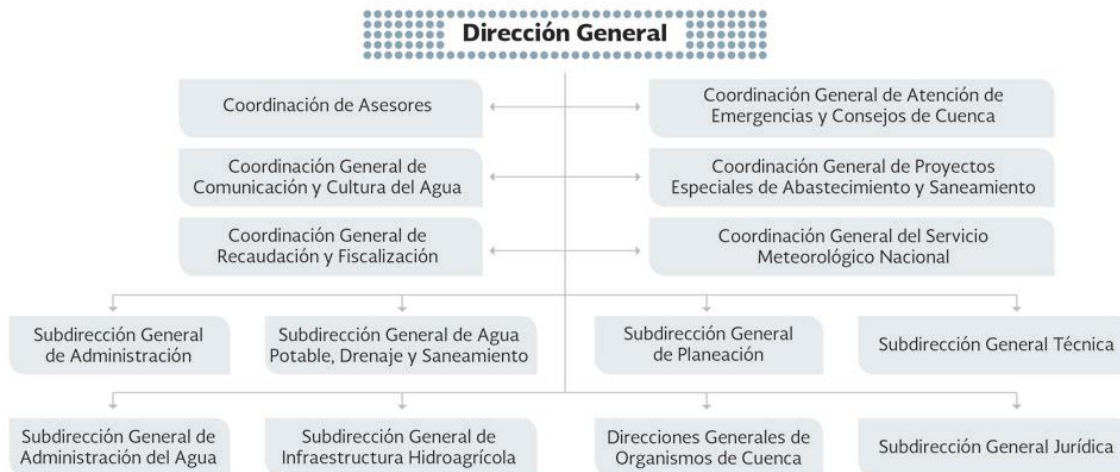
El documento rector de la política hídrica es el Programa Nacional Hídrico (PNH), que se formula cada seis años y es aprobado por el Ejecutivo Federal. Se retroalimenta, entre otros, de las Estadísticas del Agua y la Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, que se publican anualmente.

La entidad que a nivel nacional coordina la política y planificación del sector es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que está a cargo, entre otras atribuciones y funciones, de elaborar el PNH. CONAGUA es órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), que es la instancia máxima en materia técnica, normativa y consultiva de la Federación en materia de gestión integrada de los recursos hídricos.

Su misión es la de administrar y preservar en cantidad y calidad las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, con la participación de los usuarios y la sociedad, y con la vinculación de la gestión de los tres órdenes de gobierno, para lograr el uso sustentable del recurso, e implementar acciones para enfrentar los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

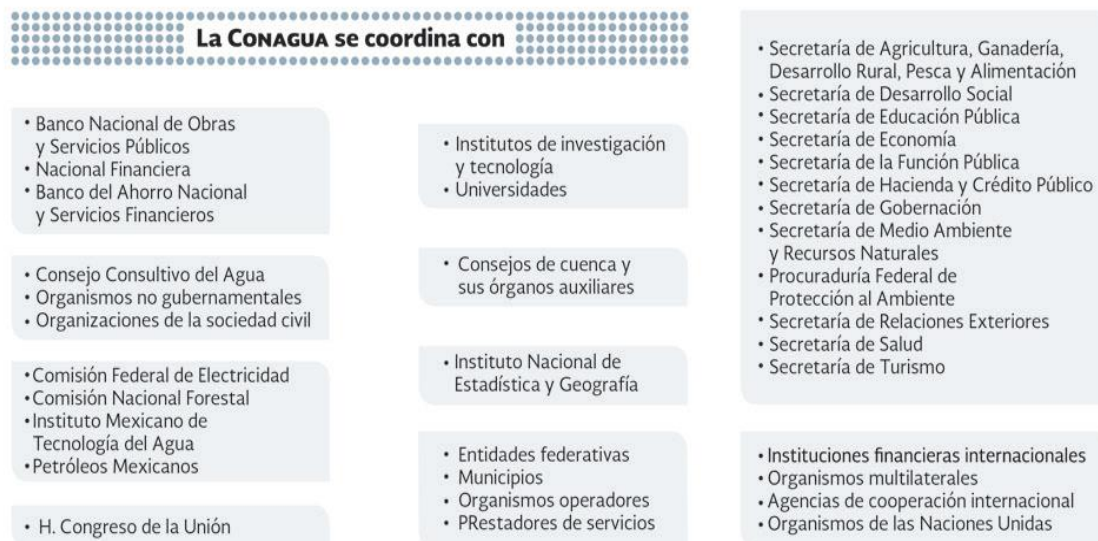
Para el desempeño de sus funciones, CONAGUA trabaja en conjunto con diversas instancias en el ámbito federal, estatal y municipal; asociaciones de usuarios y empresas; instituciones del sector privado y social, así como organizaciones internacionales. El Gráfico 11 presenta la estructura orgánica de CONAGUA y el Gráfico 12 muestra las principales instituciones con las que se coordinan los objetivos de la programación hídrica de México:

Gráfico 11. Estructura Orgánica de CONAGUA



Fuente: CONAGUA (2018), Estadísticas del Agua en México.

Gráfico 12. Principales instituciones coordinadas con CONAGUA



Fuente: CONAGUA (2018), Estadísticas del Agua en México.

En relación con el reúso de agua, a nivel federal la Constitución Política Mexicana indica que los servicios de agua y saneamiento son de orden subnacional. La Ley de aguas de 2004 en su artículo 9 le otorga a CONAGUA dos responsabilidades directas en relación con los servicios de agua y saneamiento básico:

- Promover y apoyar los servicios urbanos y rurales de agua potable, alcantarillado, saneamiento, reciclaje y reúso en coordinación con los estados mediante éstos con los municipios, lo cual no debe interferir con las responsabilidades centrales de estados y municipios sobre todo la prestación de servicios.

- Promover y apoyar el desarrollo de sistemas de agua potable y alcantarillado, saneamiento, tratamiento de aguas residuales y sistema de reúso de agua; sistemas de riego y drenaje y protección contra inundaciones.

Los principales objetivos de CONAGUA en cuanto a los servicios de agua y saneamiento son:

1. Consolidar el desarrollo técnico y la sustentabilidad financiera de los organismos operadores mediante la implementación de programas y acciones destinados a aumentar su eficiencia y mejorar la prestación de servicios.
2. Tratar las aguas residuales y alentar su reúso.
3. Aumentar la cobertura de servicios de agua y saneamiento en el país, zonas rurales y comunidades urbanas.
4. Mejorar la calidad del agua potable suministrada a la población.

CONAGUA funge como un órgano superior técnico, normativo y consultivo de la federación con funciones sobre obras, sistemas y servicios de agua potable, alcantarillado, saneamiento, reúso de aguas residuales tratadas y acciones para proteger a la población contra inundaciones a través de la Subdirección General de Agua Potable, drenaje y saneamiento.

A continuación, se presentan las funciones de los principales actores relacionados con el tema de agua y saneamiento:

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): establece junto con otras instituciones (en particular CONAGUA) y autoridades estatales y municipales, las normas oficiales de México sobre descargas de aguas residuales y vigila su aplicación en coordinación con dichas instituciones y autoridades. Junto con la secretaría de Hacienda, también define los criterios para asignar recursos e incentivos para una explotación sostenible de los recursos naturales. Finalmente, establece los límites de contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas para reúso.

La Secretaría de Salud (SS): Es responsable de establecer las normas técnicas y estándares de calidad para el tratamiento de agua para uso y consumo humano. Establece también los criterios de salud que guiarán los estándares de calidad en cuanto a descargas de aguas residuales y tratamiento de uso de éstas. Igualmente, es responsable de fomentar y apoyar el saneamiento básico; asesorar sobre criterios de ingeniería para obras de saneamiento. Además, junto con los gobiernos estatales, supervisa y certifica la calidad del agua para uso y consumo humano.

La Secretaría de Hacienda y Crédito Público: Define el presupuesto asignado al sector y financia los programas para los servicios de agua y saneamiento.

La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL): Apoya a las comunidades rurales en el desarrollo de infraestructura para el suministro de agua, alcantarillado y saneamiento.

El Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN): Es el medio de coordinación para financiar y desarrollar infraestructura en diversos sectores, incluido el del agua. Este fondo brinda financiamiento para la planeación, diseño, construcción y transferencia de proyectos de agua y saneamiento que demuestren impacto social positivo y rentabilidad aceptable y que incluyan participación obligatoria del sector privado.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX): Es una entidad pública creada en el año 2003 cuya función principal es proveer los servicios de agua potable, alcantarillado, tratamiento de aguas residuales y reúso. Tuvo a cargo la formulación del plan estratégico de gestión del agua llamado "Programa Especial del agua. Visión 20 años".

Consejo de Cuenca: El Consejo de Cuenca es un espacio de concertación en el que las instituciones y/o organizaciones vinculadas a la Gestión de los Recursos Hídricos, dan a conocer sus prioridades, en temas de demandas y/o ofertas de proyectos hidráulicos, protección ambiental del agua, cultura del agua, etc., con el fin de planificar y gestionar el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos dentro de sus ámbitos.

Aspectos legales

El caso mexicano, al igual que el de otras experiencias internacionales, llegó al reúso del agua tratada como consecuencia de la limitación y sobreexplotación de las fuentes hídricas tradicionales de agua dulce. México tiene una larga historia de reúso de agua tratada, pues desde 1956 la emplea para usos industriales y a partir de 1958 en riego agrícola. De acuerdo con el Foro Económico Mundial, México es uno de los países con mayor consumo per cápita de agua, situación agravada por los altos niveles de pérdida en la red pública de distribución de agua potable.

Por sus condiciones geográficas y climáticas, los estados del norte de México son los que sufren de mayor estrés hídrico, por lo que el reúso de agua tratada es fundamental para el equilibrio de sus reservas. Adicionalmente, los niveles de concentración de población conllevan una mayor necesidad de tratamiento y de reúso como es el caso de Ciudad de México (con más de 20 millones de habitantes

en su área metropolitana) que en su propia ley de agua potable y alcantarillado contiene varias menciones al reúso de agua tratada.

La Ley de Aguas Nacionales vigente define el reúso como “la explotación, uso o aprovechamiento de aguas residuales con o sin tratamiento previo”. México cuenta con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que a su vez puede establecer Consejos de Cuenca para determinadas cuencas hidrológicas del territorio federal. De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales que regula su naturaleza y atribuciones, estas entidades deben impulsar y fomentar el reúso de agua tratada y apoyar el desarrollo de este tipo de sistemas.

Adicional al andamiaje jurídico tradicional, México prepara para cada cuatrienio presidencial un Programa Nacional Hídrico el cual es el documento rector de política sectorial en agua del país que acompaña al Plan Nacional de Desarrollo. En muchos de estos programas, como el de la vigencia 2007-2012²² y 2013-2018 se observa la apuesta por el fortalecimiento del tratamiento y reúso de agua.

México es en la actualidad uno de los principales países respecto al volumen de agua reutilizada, la cual es empleada principalmente en riego agrícola y usos industriales, pero una parte significativa también se emplea para usos municipales (principalmente irrigación de zonas verdes, propósitos industriales y ecológicos).

De acuerdo con la normatividad, dos clases de medición de la calidad son los parámetros físicos y biológicos, así como la presencia de metales. Los niveles de concentración de estos últimos varían dependiendo del uso que se pretenda dar al agua (servicios al público con contacto directo o servicios al público con contacto indirecto u ocasional). Un incentivo importante para la industria, por ejemplo, de curtiembres, reside en que los costos en que incurre la industria para el reúso de agua son inferiores a los costos unitarios de tratamiento para cumplir con la calidad de vertimientos exigidos por la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

En síntesis, el reúso del agua en México es un fenómeno que existe desde tiempo atrás pero que ha sido desarrollado a nivel normativo a partir de la década de los 90 y que influye en la promoción del reúso en todo el territorio federal. Se destacan los siguientes factores en forma de síntesis:

- **Supervisión para el adecuado uso del agua potable y aumento en los sistemas de tratamiento:** Dada la escasez de agua potable, el nivel de supervisión en relación con su uso se ha incrementado, lo cual ha generado

²² Este programa contenía ambiciosas metas de tratamiento y reúso. Para el 2012 pretendía lograr un 60% de agua tratada en el territorio mexicano y consolidar el reúso de esta.

que se busquen alternativas diferentes al agua potable para usos agrícolas. También en algunas zonas se han incrementado los porcentajes de tratamiento de aguas con nueva infraestructura.

- **Instrumentos de política y planeación sectorial enfocados en agua:** Se formulan instrumentos de política como el Programa Nacional Hídrico que tiene apuestas y objetivos para el sector, entre los cuales se encuentra el reúso de agua tratada.
- **Existencia de autoridades con funciones concretas respecto del reúso de agua:** La existencia de la Comisión Nacional de Agua y de los Consejos de Cuenca permite que existan órganos directores de la política e intereses del Estado, quienes desde la misma ley tienen la función y el deber de impulsar y buscar el reúso del agua.

Tabla 13. Matriz normativa de las principales leyes de México en materia de reúso de agua

| Norma | Objeto |
|---|---|
| NOM-001-SEMARNAT-1996 | Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales |
| NOM-003-ECOL-1997 | Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público |
| Ley del derecho a los servicios públicos de agua potable, drenaje, alcantarillado y tecnología hídrica de la Ciudad de México | Ley de aplicación en el Distrito Federal de Ciudad de México que regula la gestión integral de los recursos hídricos y la prestación de los servicios públicos de agua potable, drenaje y alcantarillado, así como el tratamiento y reúso de aguas residuales |
| Ley de Aguas Nacionales | Regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable |
| Ley Federal de Derechos de Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales | Ley expedida por ejercicios anuales donde se establecen los pagos para el derecho de uso o aprovechamiento de bienes de dominio público de la Nación, por ejemplo, por la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores |

Conclusiones

- Aunque en México no se evidencian problemas de disponibilidad de agua en función del volumen per cápita, se ha venido presentando dificultades de disponibilidad en algunas regiones del país. Dos terceras partes del territorio se consideran áridas o semiáridas, con precipitaciones anuales menores a los 500 mm y aproximadamente el 24% están en condiciones de sobreexplotación, o con presencia de suelos salinos y agua salobre o con intrusión marina.
- Según la Comisión Nacional del Agua (Conagua) para el año 2017, del volumen de aguas residuales colectadas (215.2 m³/s) se trataron el 63% de (135.6 m³/s) y se reutilizaron 118,6 m³/s de aguas residuales, de las cuales directamente (antes de su descarga) se reutilizaron 39,8 m³/s e indirectamente (después de su descarga) fueron reutilizadas 78,8 m³/s de aguas residuales tratadas.
- Los proyectos de las experiencias documentadas se han desarrollado principalmente en zonas con problemas de intensa sequía, disminución de lluvias y de escurrimientos de aguas, sobreexplotación de acuíferos y reducción de disponibilidad de agua.
- Mediante la implementación de los proyectos documentados, se buscó mejorar la calidad de las aguas residuales generadas por los Municipios como meta del gobierno federal (a través de CONAGUA) para incrementar el tratamiento de aguas residuales a nivel nacional; disminuir la sobreexplotación de los acuíferos; facilitar el riego de los cultivos sin ninguna restricción, reduciendo los costos de las enfermedades causadas por el uso y contacto con las aguas residuales; o para ser utilizadas en los procesos de enfriamiento en la termoeléctrica y en la Refinería.
- Los procesos de tratamiento de aguas residuales para su reúso se basan en un conjunto de tratamientos preliminares, primarios, tratamientos biológicos aerobios, tratamiento de lodos y desinfección de las aguas tratadas mediante unidades UV o con cloro. Cuando se requieren para reúso industrial se implementan sistemas terciarios mediante micro y ultrafiltración y electrodiálisis reversible, como es el caso de la Termoeléctrica Guadalupe Victoria y procesos de ultrafiltración y osmosis inversa para la refinería PEMEX (que quedan dentro de la misma Refinería).
- La entidad que a nivel nacional coordina la política y planificación del sector es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), como un órgano superior

técnico, normativo y consultivo de la federación, con funciones sobre obras, sistemas y servicios de agua potable, alcantarillado, saneamiento, reúso de aguas residuales tratadas. Dentro de sus objetivos se encuentra incentivar el reúso de las aguas residuales; además de promover y apoyar, en coordinación con los estados y estos últimos con los municipios, el reúso del agua residual tratada.

- Las PTAR de los Proyectos documentados para el tratamiento de las aguas residuales domésticas para reúso agropecuario, en su totalidad alcanzan caudales del orden de 52, m³/s con inversiones cercanas a los 525,5 millones de dólares, y de agua residual tratada con destinación industrial, con caudales del orden de 0,78 m³/s tienen inversiones cercanas a 62 millones de dólares.
- El tratamiento de las aguas residuales, debido a las prácticas desarrolladas con anterioridad de aprovechar las aguas sin tratamiento, ha generado grandes controversias con los agricultores, ya que consideran que el tratamiento del agua residual les implica el aumento de las tarifas por el agua que utilizan, reducción del volumen de agua que reciben, disminución de los nutrientes en los cultivos derivados del tratamiento que los llevará a invertir en fertilizantes, así como problemas por la pérdida de cosechas. Desde el año 2019 CONAGUA y los agricultores hayan realizado diferentes mesas de trabajo para llegar a un acuerdo en el tratamiento de las aguas residuales.
- La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), establece junto con otras instituciones, autoridades estatales y municipales, las normas oficiales de México sobre descargas de aguas residuales y vigila su aplicación en coordinación con dichas instituciones y autoridades. Establece los límites de contaminantes contenidos en las aguas residuales tratadas para reúso.
- Otras entidades involucradas en la gestión de aguas residuales en México son la Secretaría de Salud (SS), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y los operadores de los servicios públicos domiciliarios.
- A nivel local, las municipalidades se encargan de planificar tanto los sistemas de agua potable como los sistemas de alcantarillado, tratamiento y reúso de aguas residuales. Tal es el caso de la ciudad de Hermosillo, quien, mediante un convenio suscrito entre el operador y la secretaría de Agricultura, Ganadería, Recursos Hidráulicos, Pesca y Acuicultura del Estado de Sonora (SAGARHPA), establecieron las condiciones para el reúso y administración de

las aguas tratadas de la PTAR Hermosillo, con destinación a actividades agropecuarias. Asimismo, se determinó una tarifa a pagar por esta agua.

- Las experiencias documentadas muestran que su ejecución se da como resultado de acuerdos establecidos entre los gobiernos municipales o federales con las Empresas de servicios públicos para Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado, Tratamiento y Disposición de sus aguas residuales y los usuarios de las aguas residuales tratadas que las requieren para uso agropecuario (Distritos de Riego en Sonoro y Valle de Mezquital), y uso industrial como son la industria termoeléctrica y Refinería en Lerdo, Durango y Ciudad Madero, Estado de Tamaulipas, respectivamente.
- Dada la escasez de agua potable en algunas regiones, el nivel de supervisión en relación con su uso se ha incrementado, lo cual ha generado que se busquen alternativas diferentes al agua potable para usos agrícolas. También en algunas zonas se han incrementado los porcentajes de tratamiento de aguas con nueva infraestructura.
- México cuenta con instrumentos de política como el Programa Nacional Hídrico que tiene apuestas y objetivos para el sector, entre los cuales se encuentra el reúso de agua tratada.
- La existencia de la Comisión Nacional de Agua y de los Consejos de Cuenca permite que existan órganos directores de la política e intereses del Estado, quienes desde la misma ley tienen la función y el deber de impulsar y buscar el reúso del agua.

3.2.1.2. Chile^{23 24}

Generalidades

Chile está situado a lo largo de la costa occidental del cono sur de Sudamérica, entre el segmento más alto de la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico.

El territorio de la República se divide en 15 regiones y éstas en provincias. Para los efectos de la administración local, las provincias se dividen en comunas.

Gráfico 13. Mapa de Chile



Fuente: Oficina de información diplomática, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, Ficha de país Chile, 2019

²³ Claves para la gestión de aguas residuales rurales. Primera planta de reúso de aguas tratadas en la Región de Coquimbo. Fundación Chile, mayo de 2018.

²⁴ Aguas residuales como nueva fuente de agua. Diagnóstico del potencial reúso de aguas residuales en la región de Valparaíso. Fundación Chile - Gobierno Regional de Valparaíso. 2016.

Disponibilidad y uso de agua

En Chile existen tres regiones climáticas: desértica en el norte, Mediterránea y Templada en su zona central y húmeda-fría en la región sur. (FAO, 2015).

En cuanto a las precipitaciones en el territorio se distinguen dos patrones; uno con precipitaciones concentradas en el periodo de verano, presente en la zona norte del país; y otro con precipitaciones en el periodo de otoño invierno, que prevalece en el resto del territorio. (FAO, 2015).

La precipitación aumenta, de norte a sur y de oeste a este, variando desde una precipitación casi nula en el desierto de Atacama a los 3 000 mm que se registran en la Región XI. El volumen de agua procedente de las precipitaciones y que escurre por sus cuencas es de 53,000 m³/habitante/año. (Gobierno Nacional, 2013).

Chile presenta a lo largo de su superficie 101 cuencas y 467 subcuencas fluviales, relativamente pequeñas, y con fuertes pendientes dadas por la Cordillera de Los Andes. (FAO, 2015).

En Chile, los usos consuntivos más frecuentes del recurso agua son el riego de cultivos agrícolas y bebida, uso doméstico y saneamiento, mientras que los usos no consuntivos se concentran en la actividad industrial, piscicultura y energía hidroeléctrica.

La extracción hídrica total nacional para el año 2006 alcanzó los 35.43 km³, de los cuales 29.42 km³ fueron extraídos por la agricultura, equivalente al 83 % del total de las extracciones; 1.27 km³ por las municipalidades (4 % del total de las extracciones), y 4.74 km³ por la industria (13%). (FAO, 2015).

Tabla 14. Disponibilidad y usos de agua en Chile

| Variable | Año | Valor | Unidad |
|--|------|---------|-----------------------------------|
| Recursos hídricos | | | |
| Precipitación anual promedio | 2011 | 1 522 | Milímetros de agua (mm) |
| Recursos hídricos renovables totales | 2015 | 923.000 | Millones de m ³ al año |
| Recursos hídricos renovables por persona | 2013 | 52.384 | m ³ /hab/año |
| Extracción de agua | | | |
| Agrícola | 2006 | 29.419 | Millones de m ³ /año |
| Abastecimiento Público | 2006 | 1.267 | Millones de m ³ /año |
| Industrial | 2006 | 4.744 | Millones de m ³ /año |

Fuente: FAO. (2015). AQUASTAT Perfil de País - Chile. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Producción de aguas residuales y su tratamiento

Chile ha alcanzado niveles de cobertura en el tratamiento de las aguas residuales del 99% en sectores urbanos, cuenta con 297 sistemas de tratamiento de aguas residuales autorizados y monitoreados por la Superintendencia de Servicios Sanitarios a lo largo del territorio nacional (SISS, 2018).

Respecto a los sistemas de tratamiento utilizados, se pueden distinguir los siguientes: lodos activados (60%), lagunas aireadas (19%), emisarios submarinos²⁵ (11%), Lagunas de estabilización (4%), tratamiento primario y desinfección (4%) y otros (2%). (FAO, 2013).

En el país se eliminan aproximadamente 8 m³/s de aguas residuales domésticas e industriales a través de emisarios submarinos. (Fundación Chile, 2018).

La mayor parte de las aguas residuales no tratadas son vertidas a los cauces de los ríos y el mayor porcentaje de reutilización en agricultura se produce de forma indirecta. El 1.1% de las aguas residuales tratadas se usa de forma directa y planificada en el riego agrícola (13 millones de m³ al año). (FAO, 2013).

La Región Metropolitana de Santiago es la región que mayor caudal de aguas residuales genera. Se calculó que utilizar los 12,52 m³/s efluentes de las PTAR en operación permitirían incorporar a la superficie total de riego de esa Región más de 12 500 ha nuevas, lo que equivaldría un incremento del 9.15 % de la superficie actual. (FAO, 2013).

Descripción del(os) Proyecto(s)

Las experiencias en materia de reúso de aguas servidas en Chile son escasas. En los últimos años han surgido algunos intentos de implementar proyectos de reúso de aguas residuales tratadas, sin embargo, muchos no han prosperado debido principalmente a la desconfianza sobre la calidad de las aguas recicladas (Fundación Chile, 2018). Existen algunas iniciativas en el norte del país para la recuperación de aguas contaminadas para su posterior uso, tanto en el ámbito agrícola como minero.

En el año 2014, la Fundación Chile realizó el Proyecto FIC (Fondo de innovación para la competitividad), denominado "Diagnóstico Potencial de reúso de aguas residuales tratadas en la región de Valparaíso" financiado por el Gobierno regional de Valparaíso.

²⁵ Emisarios Submarinos: son tuberías que conectan la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales con el mar.

El Proyecto planteó la opción de una nueva fuente de agua basada en el agua residual tratada, por medio de un modelo conceptual que evalúa diferentes escenarios de reuso de las aguas residuales. Se consideró el agua residual proveniente de los emisarios submarinos que es desaprovechada al descargarla al mar y cuyo volumen en la región de Valparaíso alcanzaría para regar aproximadamente 27 mil hectáreas de uva. El Proyecto incluyó varios escenarios de reuso que fuesen viables técnica y económicamente para enfrentar el problema de disponibilidad de agua e incentivar el desarrollo económico de los sectores productivos locales.

Se contempló como potenciales beneficiarios del agua residual tratada la agricultura, la industria y la minería quienes, al aprovecharlas pueden potencialmente dejar disponible el agua de los acuíferos para otros usos como por ejemplo el consumo humano. Sin embargo, solo avanzó hasta su evaluación de factibilidad y está pendiente su implementación.

Drenaje agrícola

De acuerdo con la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos, el 70% del consumo tanto en Chile como en el mundo corresponde a la actividad agrícola, siendo el mayor demandante de agua dulce.

A marzo de 2015 el 56% del total de comunas del país habían sido decretadas en emergencia agrícola por sequía, lo cual impuso un desafío de lograr una gestión hídrica sustentable, ante el avance del desierto hacia el centro del país.

En Valparaíso, por ejemplo, en el año 2015, el 86% de las comunas fueron declaradas en escasez hídrica y en emergencia hidráulica. (Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025, 2013).

Teniendo en cuenta esa situación, surgió la necesidad de encontrar alternativas de nuevas fuentes para suplir la escasez, entre ellas la captación de aguas lluvias, el transporte o trasvase de agua desde otras cuencas, la desalinización de agua de mar y reuso de aguas residuales tratadas.

Planta de aguas residuales tratadas para uso productivo en zonas rurales de Chile - PTAR Cerrillos de Tamaya

El Proyecto se ubica en la localidad de Cerrillo en la provincia de Tamaya en la comuna de Ovalle, región de Coquimbo y permite reusar el agua en el riego de cultivos de alfalfa.

En enero de 2018 se ejecutó un proyecto con la Fundación Chile, financiado por el gobierno regional de Coquimbo a través del fondo de innovación para la

competitividad Regional (FIC- R-2015), y se inauguró la primera planta de aguas residuales tratadas para uso productivo en zonas rurales de Chile.

El Proyecto permite generar experiencia y conocimiento para destrabar potenciales barreros regulatorias de Chile, mejorar la percepción del reúso al asegurar los estándares internacionales de calidad y demostrar que se puede aprovechar la infraestructura existente dándole un valor agregado. El objetivo es transformar esta iniciativa en un referente a nivel nacional y también para la región latinoamericana como ejemplo de reúso productivo sustentable y replicable.

La planta de tratamiento de aguas residuales fue construida en el año 2005 (previo al inicio del proyecto de reúso) y financiada por un Fondo Nacional de Desarrollo Regional, utilizando un lote de aproximadamente 1000 m². Es administrada por el Comité de agua potable Rural (APR) de Cerrillos de Tamaya, organización comunitaria sin fines de lucro con participación voluntaria de sus socios. Ese comité administra, opera y mantiene el servicio de agua potable de la ciudad, además del sistema de tratamiento construido para tratar las aguas servidas generadas por la comunidad.

Aspectos técnicos

La iniciativa fue del comité de Agua Potable Rural y consistió en la recuperación de la planta existente de tratamiento de aguas servidas para cumplir con la norma del decreto 90 y ser transformada en una planta con tecnología de lodos activados, dándole un uso productivo a los 6 l/s de aguas tratadas, proveniente de unas 2.000 personas que viven en la localidad.

La planta es operada y administrada por la propia comunidad, que con el apoyo del Gobierno Regional de Coquimbo y la Fundación Chile, dieron el apoyo técnico y financiero. Es una de las plantas rurales más grandes que hay en la región y está ubicada a 50 metros de terrenos aptos para cultivo.

Uso del agua: El agua tratada se utiliza para cultivo de alfalfa, lo que finalmente termina en una cadena, pues se da empleo a habitantes de la localidad para la cosecha y luego se venden los fardos en el mismo lugar.

La condición positiva del proyecto conllevó a un acuerdo entre el agricultor y la administración de la Planta de tratamiento, en el cual se estableció un modelo de distribución de ganancias con compromisos entre las partes.

La administración de la planta de tratamiento se hace responsable de operar de manera óptima el sistema de tratamiento, generando calidad de aguas de riego (Cumplimiento de DS90/2000), mientras que el agricultor adquiere el

compromiso de hacerse cargo integralmente de la operación y funcionamiento del sistema de reúso, además de gestionar la venta del producto agrícola generado, entregando un porcentaje de las ventas a la administración de la planta de tratamiento.²⁶

Gráfico 14. Registro Fotográfico PTAR Cerrillos de Tamaya



Fuente: FCH, F. (31 de junio de 2017). Reúso de aguas residuales urbanas y rurales en Chile: Factibilidad e impacto como nueva fuente de agua para zonas de escasez hídrica.

Es de anotar que en Chile no hay normatividad sanitaria vigente que regule específicamente el reúso de aguas servidas tratadas, ni tampoco existen restricciones legales para la utilización de aguas de los emisarios y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas rurales.

Sin embargo, existe normatividad para los valores límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales, las cuales se presentan en la Tabla 15, donde también se presenta la comparación con otras normas nacionales e internacionales.

Tabla 15. Comparación de normatividad internacional y nacional para componentes y parámetros presentes en aguas residuales para reúso agrícola

| | Unidades | D.S.90/2001 | NCh 1333 of 78 | Guía Australiana y Neozelandesa | Canadian Environmental Water Quality | U.S. Environment Protection Agency | FAO 1984 |
|-----------------------------|----------|-------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|
| pH | | 5,5 - 8,5 | | | | 6 | |
| Temperatura | °C | 35 | | | | | |
| Sólidos suspendidos totales | mg/L | 80 | | | | | |
| Aceites y grasas | mg/L | 20 | | | | | |

²⁶ Ídem

| | Unidades | D.S.90/2001 | NCh 1333 of 78 | Guía Australiana y Neozelandesa | Canadian Environmental Water Quality | U.S. Environment Protection Agency | FAO 1984 |
|--------------------------|----------|-------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|
| Hidrocarburos fijos | mg/L | 10 | | | | | |
| DBO5 | mgO2/L | 35 | | 600 | | | |
| Aluminio | mg/L | 5 | 5 | 5,0 - 20 | 5 | 5,0 20 | 5 |
| Arsénico | mg/L | 0,5 | 0,1 | 0,1 - 2 | 0,1 | 0,1 - 2,0 | 0,1 |
| Boro | mg/L | 0,75 | 0,75 | 0,5 | 0,5 - 6,0 | 0,75 - 2,0 | |
| Cadmio | mg/L | 0,01 | 0,01 | | | 0,01 - 0,05 | 0,01 |
| Cianuro | mg/L | 0,2 | 0,2 | | | | |
| Cloruros | mg/L | 400 | 200 | | 100 - 700 | | |
| Cobalto | mg/L | | | 0,05 - 0,1 | 0,05 | 0,05 - 5,0 | 5 |
| Cobre total | mg/L | 1 | 0,2 | 0,2 - 5 | 0,2 - 1,0 | 0,2 - 5,0 | 0,2 |
| Cromo hexavalente | mg/L | 0,05 | 0,1 | | 0,008 | 0,1 - 1,0 | 0,1 |
| Fluoruro | mg/L | 1,5 | 1 | | 1 | 1,0 - 15 | |
| Fosforo Total | mg/L | 10 | | 0,05 - 12 | | | |
| Hierro disuelto | mg/L | 5 | 5 | | 5 | 5,0 - 20 | 5 |
| Incrustación / Corrosión | | | | | | | |
| Manganeso | mg/L | 0,3 | 0,2 | | 0,2 | 0,2 - 10 | 0,2 |
| Mercurio | mg/L | 0,001 | 0,001 | 0,002 | | | |
| Molibdeno | mg/L | 1 | 0,01 | 0,01 - 0,05 | 0,01 - 0,05 | 0,01 - 0,06 | 0,01 |
| Níquel | mg/L | 0,2 | 0,2 | | 0,2 | 0,2 - 2,0 | 0,2 |
| Nitrógeno Kjeldahl total | mg/L | 50 | | 5 - 125 | | | |
| Pentaclorofenol | mg/L | 0,009 | | | | | |
| Plomo | mg/L | 0,05 | 5 | | 0,2 | 5,0 - 10,0 | 5 |
| SAR | mg/L | | | | | | |
| Selenio | mg/L | 0,01 | 0,02 | | 0,02 - 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| Sodio | mg/L | | | | | | |
| Sulfatos | mg/L | 1000 | 250 | | | | |
| Sulfuros | mg/L | 1 | | | | | |
| Tetracloroetano | mg/L | 0,04 | | | | | |
| Tolueno | mg/L | 0,4 | | | | | |
| Triclorometano | mg/L | 0,2 | | | | | |
| Turbiedad | NTU | | | | | | |
| Xileno | mg/L | 0,5 | | | | | |
| Zinc | mg/L | 3 | 2 | 2,0 - 5,0 | 1,0 - 5,0 | 2,0 - 10,0 | 2 |
| Índice de fenol | mg/L | 0,5 | | | | | |

| | Unidades | D.S.90/2001 | NCh 1333 of 78 | Guía Australiana y Neozelandesa | Canadian Environmental Water Quality | U.S. Environment Protection Agency | FAO 1984 |
|--------------------|------------|-------------|----------------|---------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|
| Poder espumogeno | mm | 7 | | | | | |
| Coliformes fecales | NMP/100 MI | 1000 | 1000 | | 100 | | |

Fuente: Fundación Chile. (2018). Claves para la gestión de aguas residuales rurales, Primera Planta de Reúso de Aguas Tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable. Santiago de Chile: Proyecto financiado por el Gobierno Regional de Coquimbo a través del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC).

La selección del cultivo de alfalfa en un terreno de 6 Ha se realizó tras un análisis de factibilidad de las alternativas productivas que incorporó, entre otros, los estándares internacionales de riesgo y cultivos que pueden producirse utilizando este tipo de aguas, la destinación del cultivo, y aspectos técnicos del sistema de riego.

Tras el análisis de los principios generales que rigen y habilitan el reúso de aguas residuales tratadas, se seleccionó un cultivo que se utilizaría en este primer caso de reúso productivo. Tomando en consideración las normas de inocuidad que estos principios establecen, se optó por la producción de alfalfa, debido a que el establecimiento de este cultivo es rápido y de bajo costo, y es utilizado para alimentación animal, por lo que, tomando las medidas de secado, se resguardan las condiciones de inocuidad para este uso. Junto a esto, la localidad de Cerrillos de Tamaya posee una población importante de caprinos, lo que permite que la comercialización del producto agrícola sea rápida y económica en cuanto a su transporte, reduciendo gastos en los que debe incurrir el agricultor.

También está establecido un sistema de riego por aspersión para la alfalfa, cuya ventaja principal es que puede ser controlado con base en la demanda máxima de agua para riego, el coeficiente de cultivo y la eficiencia de aplicación.

Aspectos financieros

La Tabla 16 muestra el análisis económico de ganancias realizado para el cultivo de alfalfa considerando valores de productividad estándar.

Tabla 16. Análisis económico de ganancias

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|---|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Inversión sistemas de riego y eléctrico (\$USD) | \$ 65.000 | | - | - | - | - |

| | Año 0 | Año 1 | Año 2 | Año 3 | Año 4 | Año 5 |
|---------------------------------------|----------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Inversión labores agronómicas (\$USD) | \$ 6.300 | | - | - | - | - |
| Nº cortes /año | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Hectáreas cultivadas (ha) | | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Productividad (fardos/ha) | | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Precio venta fardos (\$USD /fardo) | | \$ 6 | \$ 6 | \$ 6 | \$ 6 | \$ 6 |
| Rendimiento económico total (\$USD) | | \$ 31.767 | \$ 31.767 | \$ 31.767 | \$ 31.767 | \$ 31.767 |
| Ingreso neto (\$USD /año) | | -\$ 46.000 | -\$ 14.000 | \$ 17.500 | \$ 49.300 | \$ 81.100 |

Este proyecto fue financiado por GORE a través del FIC, por lo que la ganancia en este primer sistema es de 31.145 dólares anuales. En caso de que esto fuera íntegramente financiado por un privado, el costo de inversión sería recuperado luego de 2 años.

Fuente: Fundación Chile. (2018). Claves para la gestión de aguas residuales rurales, Primera Planta de Reúso de Aguas Tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable.

Uso de aguas lluvias

Proyectos sustentables con enfoque en gestión hídrica en las regiones de O'Higgins y del Maule.²⁷

El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), adelantó el Programa de Trabajo "Proyectos sustentables con enfoque en gestión hídrica en las regiones de O'Higgins y del Maule" financiado por la Subsecretaría de Agricultura - Ministerio de Agricultura, que permitió la elaboración del boletín "Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias".

Este Proyecto se apoyó en otros proyectos como el "desarrollo de técnicas de reciclaje y reutilización de las aguas lluvias cosechadas, para cultivos en Invernadero en la región de O'Higgins", que sentó las bases de las distintas técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias que se documentan. El Proyecto tuvo apoyo de 400 productores de las regiones de O'Higgins y Del Maule, que facilitaron parte de sus predios para la construcción de unidades de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias.

²⁷ Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA- No. 321. INIA, Rayentué. Rengo, Chile, 2016.

Dicho Proyecto tuvo participación de Autoridades locales de O'Higgins, secretaria regional de Salud de O'Higgins y el Instituto de Desarrollo Agropecuario. Los conjuntos de experiencias desarrolladas permitieron la elaboración del boletín que presenta distintos temas relacionados con el agua lluvia, acumulación y hasta el aprovechamiento final de las aguas lluvias.

Ubicación

La Región del Libertador Bernardo O'Higgins posee una superficie total de 1.647.000 hectáreas, y de ellas un 973.348 presentan niveles de erosión que van desde muy leve a muy grave (CIREN 2009).

Así mismo se presentan problemas de escasez de agua debido a la falta de precipitaciones, que complica la producción de cultivos, lo que origina una baja productividad agrícola. Por lo tanto, el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico se transforma, además, en una prioridad como medio de subsistencia en las áreas rurales de secano, donde la competencia por este recurso se basa en satisfacer, en primer lugar, la demanda de consumo humano, y, en segundo lugar, el excedente para la producción agrícola.

En la zona del secano costero norte de la Región de O'Higgins, el promedio histórico de precipitaciones de los últimos 45 años ha sido de 796,6 mm. Sin embargo, éstas han ido disminuyendo en la última década, haciendo crisis en los años 2009, 2010, 2011, y 2013 y 2015, al no superar los 600 mm acumulados en el año, afectando con ello la recarga de norias, y el abastecimiento de agua de bebida y de riego a los productores de la zona.

Igualmente, esta situación ha generado un problema de escasez de agua en las comunas del secano, principalmente en el período que va desde fines de primavera a comienzos de otoño, es decir entre 4 a 5 meses con ausencia de lluvias, lo que ha obligado a las municipalidades de estas comunas a distribuir agua entre las comunidades rurales, utilizando para ello, camiones aljibe que acuden una vez por semana y distribuyen 1.000 litros por familia, lo cual, muchas veces, es insuficiente para abastecer las necesidades de los habitantes del secano.

Hasta hace algunos años, en el secano de las regiones de O'Higgins y del Maule, existía una no despreciable cantidad de pequeñas fuentes de agua que se estaban utilizando a su máximo potencial, para fines de riego agrícola. Sin embargo, producto de la disminución de las precipitaciones en los últimos años, éstas hoy en día se han ido agotando y no han tenido la capacidad de recuperarse para cubrir las necesidades de agua de los productores del secano. Lo anterior, sumado al terremoto del 27 de febrero del 2010, el cual produjo un cambio en las napas, y con ello, en la disponibilidad de agua de las norias, ha conllevado a una

reducción considerable en el volumen utilizable. En este sentido, se han visto en la necesidad de buscar alternativas que permitan un aprovechamiento del único recurso disponible para abastecer de aguas a las áreas de secano, entre ellas la captación de aguas de lluvia.

Aspectos técnicos

La primera etapa es la captación de lluvias, que es una técnica que permite capturar o desviar la precipitación de agua caída en un área determinada, para ser utilizada en el riego de cultivos bajo invernaderos, huertas familiares, o en la vida diaria de los hogares de los productores de zona áridas.

En la Región de O`Higgins, entre los años 2009 y 2010, y gracias al Apoyo del PNUD, la Junta de Vecinos "La Aguada", con el apoyo técnico del INIA, desarrollaron un proyecto de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias para pequeños productores, incorporando un innovador sistema de "cosecha y manejo de aguas lluvias", el cual capta agua desde los techos de las casas y las conduce a través de canaletas, hasta contenedores de capacidad de 1.000 a 5.000 litros, lo que les permite almacenar y poder contar, con el valioso recurso en los meses de escasez hídrica.

Posteriormente, en el año 2011, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) inició el proyecto "Desarrollo de técnicas de reciclaje y reutilización de las aguas lluvias cosechadas, para cultivos en invernadero en la Región de O`Higgins", contando para ello con el apoyo del Gobierno Regional (GORE), que permitió instalar en esa región 50 unidades de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias, en proporción a un igual número de predios de pequeños agricultores.

Paralelamente, el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) en la misma región, estableció un número cercano a las 200 unidades de captación, acumulación, y aprovechamiento de aguas lluvias, en predios de igual número de pequeños productores.

Para ello se utilizaron los techos de las casas para la captación del agua, y estanques de 5.000 litros para la acumulación, la cual se fue utilizando en la producción de hortalizas bajo invernadero, con riego por goteo.

Entre los años 2014 y 2015, gracias a un proyecto de desarrollo financiado por la Subsecretaría de Agricultura, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) inició un programa de trabajo sin precedentes en Chile, orientado a establecer un número cercano a las 400 unidades de captación, acumulación, y

aprovechamiento de aguas lluvias, en predios de pequeños agricultores de las regiones de O`Higgins, del Maule, y de la Araucanía.

Al mismo tiempo la Comisión Nacional de Riego (CNR) y el INIA suscribieron un convenio para el establecimiento e instalación de 18 sistemas piloto de cosecha de aguas lluvias, utilizando los techos de las viviendas para la captación, para su posterior almacenamiento en estanques flexibles de 10.000 litros, y su subsiguiente aplicación a cultivos hortícolas y forrajeros. El agua era utilizada en las regiones de Los Lagos, Aysén, y Magallanes y la Antártica chilena, que incorporan invernaderos de policarbonato para la producción de cultivos.

Estos estudios piloto y trabajos conjuntos interinstitucionales han permitido incorporar el Concepto de "cosecha de aguas lluvias" que a finales del 2018 eran cercanas a 1000 unidades.

Para la región de O`Higgins se recomiendan tres formas de captación de aguas lluvias:

1. "In situ" en el suelo:

A través de distintas técnicas que faciliten la infiltración del agua de escorrentía y su acumulación en el perfil de suelo.

Una de las técnicas es el **Subsolado o escarificado del suelo**: facilita la infiltración del agua en el perfil del suelo. Por ejemplo, un tractor con una potencia superior a 110 Hp y con un arado subsolador, con 3 o 5 puntas (subsoladores) montados en un chasis, trabajando en un suelo lo más seco posible. (ver Gráfico 15)

Gráfico 15. Labor de subsolado Centro Experimental Hidango, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA)



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile : INIA, Rayentué .

Este proceso va acompañado de la observación y el reconocimiento de un terreno, es una práctica necesaria tanto para observar si existen las condiciones adecuadas del suelo para el desarrollo de las raíces de las plantas, como para una adecuada infiltración del agua de lluvias en el perfil del suelo.

Aspectos relacionados con las técnicas de observación y de las formas de utilización de la técnica son referenciadas en el boletín para mayor ilustración de los trabajos.

Otra de las técnicas son las denominadas **Aguadas superficiales o pequeños tranques**. Esta es una de las formas más importantes de Captar y Almacenar las aguas lluvias en los terrenos agrícolas, a través de las aguadas superficiales de 100 a 500 m³ de capacidad (Ver Gráfico 16), que consiste en utilizar el agua de lluvia que cae al suelo y escurre manejándola desde su captación, conducción, y acumulación, con el fin de incrementar la productividad de los terrenos. Estas aguas pasan a constituir reservas acuíferas en las zonas de secano, que pueden servir, bien como bebida animal, o bien para el riego de cultivos.

Gráfico 16. Aguadas Superficiales - Comunas de Navidad y Litueche Región de O`Higgins



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile: INIA, Rayentué.

2. Colectarla en los techos de las casas:

Se recogen las aguas lluvias desde los techos de las casas y todo tipo de construcción, que pueda existir en un predio agrícola (Gráfico 17), para conducirla por sistemas de canaletas, tuberías y filtro hasta un estanque acumulador de

plástico polietileno, o a una cisterna flexible (Gráfico 18), o una cisterna de ferrocemento, que corresponde a una estructura de una mezcla de fierro, cemento, arena, y gravilla (Gráfico 19)

Gráfico 17. Sistema captación en techos, conducción y filtro de polietileno



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile: INIA, Rayentué.

Gráfico 18. Cisterna flexible de 10.000 litros con techo protector - Comuna de Litueche, Región de O`Higgins y Comuna de Natales, Región de Magallanes y la Antártica chilena



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile: INIA, Rayentué.

Gráfico 19. Cisternas concreto y ferrocemento - Comuna de Pichilemu.



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile: INIA, Rayentué.

La opción de colecta y acumulación de aguas lluvias a través de techumbres y otras estructuras receptoras de similares características, exhibe la alternativa de un aprovechamiento distinto en zonas de baja disponibilidad de agua, al considerar el uso reciclado del agua en cultivos hidropónicos de hortalizas y forrajes hidropónicos como una opción eficiente para la producción de alimento humano y animal.

Lo anterior tiene una gran importancia para la agricultura familiar campesina, porque INIA ha demostrado que con techos de 32 a 48 m², canaletas de colecta de aguas, tuberías para la conducción del agua colectada, y un estanque de capacidad de 10.000 litros, un productor puede llegar a acumular más de 20.000 litros de agua en una temporada, considerando una precipitación anual de 500 mm. Lo ideal es que el productor vaya utilizando el agua acumulada, por ejemplo, para la producción de hortalizas de invierno, y bajo invernadero con riego por goteo, haciendo uso del agua de las primeras lluvias, lo que deja espacio en el estanque para acumular el agua de las sucesivas precipitaciones que caerán durante el año. De esta forma, se puede llegar a acumular un volumen de agua lluvia que puede triplicar la capacidad del estanque, y con ella producir hortalizas durante los meses de mayo a noviembre.

El cálculo del agua colectada se realiza considerando que 1 milímetro de agua caída en una lluvia corresponde a 1 litro de agua caída en 1 metro cuadrado de una superficie horizontal. Se considera un 20% de pérdida de agua a causa de la salpicadura de la lluvia al impactar sobre los techos, y de pérdida en las canaletas que la recogen cuando el agua sobrepasa su capacidad de conducción, por lo cual y para cálculo del agua recogida, se debe considerar un factor de eficiencia de un 80%. Además, un techo se construye con cierta inclinación, lo que significa que la lluvia es recibida por una superficie no horizontal, necesaria para su escurrimiento.

Se cuenta con experiencias en variantes de captación con techos de zinc, almacenamiento en tanques plásticos de 5000 Lts y utilización de invernaderos en plástico de polietileno UV, adecuado para producción de hortalizas de autoconsumo, además de volúmenes de agua a acumular por área de techo y mm de agua caída.

El presupuesto de los valores de materiales y costos, para un sistema de colecta de aguas lluvias, utilizando una cisterna flexible de 10.000 litros, para la acumulación de aguas lluvias de una casa es de 1.457 USD, pero se aclara que tanto la disponibilidad de materiales como los precios pueden variar dependiendo del proveedor y ciudad donde se adquieran. No incluye valor de mano de obra.

El valor en materiales y costo de construcción de una cisterna semienterrada de ferrocemento de 10.600 Lts (3 m de diámetro y 1,5 m de altura) es de 1085 USD. A ese valor se debe agregar el valor de mano de obra que puede ascender a un valor entre 607 a 630 dólares.

3. Colectaría de atrapanieblas:

Otra alternativa tecnológica de captura de aguas, para la agricultura familiar campesina, que se ha evaluado a través de trabajos desarrollados por INIA, es el Sistema Atrapanieblas, que consta de una malla raschel doble, con un área de 40 m² de colecta, la cual va sujeta por dos postes de 6 metros de altura y entre 12 a 14 cm de diámetro, los cuales son unidos por una serie de cables de acero galvanizado que a su vez van enterrados en el suelo soportados por anclajes de 1 m³, de una mezcla de cemento, arena, grava, y reforzados con rocas. (ver Gráfico 20 y Gráfico 21)

Gráfico 20. Estructura atrapanieblas con malla Raschel – 40 m² de superficie – comunas La aguada y Navidad – Región de O’Higgins. Región de O’Higgins.



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile : INIA, Rayentué .

Gráfico 21. Canaleta de 10 m de largo bajo malla Raschel para captación de agua neblina o lluvia - Comuna de Litueche, Región de O’Higgins



Fuente: Carrasco Jiménez, J. (2016). Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias. Chile : INIA, Rayentué .

La malla Raschel del “Atrapanieblas” capta el agua de las gotas de neblina arrastrada por el viento, las cuales son trasladadas gravitacionalmente a través de un sistema de tuberías hacia un estanque de acumulación, y luego a la red de agua de los habitantes de un sector.

Aspectos financieros

Los costos estimados para la construcción de un sistema “Atrapanieblas” simple son de 389 Dólares. Se le debe agregar la mano de obra que puede alcanzar los 445 USD para un total de 834 USD.

Dificultades y Retos

Con respecto a las lluvias colectadas, los volúmenes de agua son similares a los techos de las casas, de igual área de captación, con la diferencia que el agua captada es limpia, siendo adecuada para bebida humana y producción de hortalizas y/o forraje verde hidropónico bajo invernadero.

La cantidad de agua captada mediante la tecnología de “Atrapanieblas”, dependerá de la cantidad de estructuras instaladas, del nivel y frecuencia de neblinas, y de las precipitaciones del sector donde estén instalados estos sistemas. En la medida que exista una mayor superficie de captación de malla Raschel, mayor será el volumen de agua colectado.

Es necesario tener en cuenta los aspectos técnicos de la instalación y construcción del atrapanieblas, las redes de recolección y conducción hasta el sitio de almacenamiento. Así mismo, los aspectos técnicos y constructivos relacionados con las aguadas superficiales y profundas, los pozos noria, cuyo diámetro es alto con respecto a su profundidad y que son una alternativa muy usada en las zonas de secano y otras áreas, puesto que se pueden construir a bajo costo -incluso bastaría el construirlas a mano- y tienen la capacidad de almacenar agua en su interior y los pozos zanja (dren) que corresponden a excavaciones de mayor tamaño que los pozos noria, generalmente realizados con maquinaria. En este caso la gran área de las paredes determina la capacidad del pozo. Por lo tanto, también es importante la profundidad de excavación.

De igual manera, se trabaja en el desarrollo de consideraciones técnicas y criterios asociados a la construcción de invernaderos que van a permitir a los usuarios una productividad en sus cultivos y mejor utilización del recurso agua, favoreciendo el autoconsumo o venta de productos de calidad e inocuidad.

Estudio Cosecha de Aguas Lluvias en Áreas de Secano Región de Coquimbo²⁸

El Gobierno Regional de Coquimbo, junto con la Corporación Regional de Desarrollo Productivo, desarrolló el estudio: Cosecha de Aguas Lluvias en áreas de Secano de la Región de Coquimbo, buscando técnicas que permitan aminorar los efectos que causa esta condición de escasez hídrica en la región.

El objetivo del estudio fue diseñar en una etapa de investigación, la cosecha de aguas lluvias en tres microcuencas en el secano de la Región de Coquimbo. Así mismo, diseñar las obras requeridas y establecer una metodología de diseño para este tipo de obras, que permita posteriormente evaluar el costo de inversión de estas obras versus los volúmenes de agua que pueden acumularse superficial y subterráneamente con estas intercepciones de flujo de agua.

El proyecto se presenta por la importancia en la metodología desarrollada no solo en los procesos de ingeniería, sino también en el aspecto social e integración con la comunidad para determinar las mejores alternativas y los costos que conlleva su implementación en cualquier región con escasez hídrica. A la fecha no se tiene información de su ejecución pues requería de recursos para su implementar, pero podría replicarse en cualquiera de nuestros países con condiciones similares.

Aspectos técnicos

El estudio, si bien se denomina Cosecha de Aguas Lluvias, involucró el diseño de intercepción y acumulación de agua superficial e intercepción del flujo subterráneo desde la superficie del suelo hasta una profundidad de cinco (5) metros, que, en otros términos, corresponde al diseño de embalses subterráneos o recargas de acuíferos naturales.

El estudio comprendió:

1. **Revisión bibliográfica:** tanto internacional como nacional, con el objeto de contar con antecedentes técnicos y prácticos que se han desarrollado en este aspecto.
2. **Selección de microcuencas** para identificar puntos de emplazamientos de obras de intercepción de flujo superficial y subterráneo del escurrimiento de aguas lluvias. Estudios geográficos y vegetación.

²⁸ Estudio cosecha de aguas lluvias en áreas de secano región de Coquimbo. Jorge Romero Navea Ingeniero Agrónomo Consultor en Proyectos de Riego Agrícola. 2015. Corporación Coquimbo. Gobierno Regional – Región de Coquimbo. Resumen ejecutivo.

3. **Topografías de los sectores** de las microcuencas seleccionadas y donde se diseñarán los emplazamientos de las obras de interceptación del escurrimiento de las aguas lluvias.
4. **Estudios geofísicos**, para realizar una descripción geofísica del suelo para identificar sus estratos geofísicos y ubicar el estrato impermeable o roca fundamental.
5. **Estudios hidrológicos**, para determinar la escorrentía en los sectores seleccionados, calcular las crecidas, con un período de retorno de 1 en 200 años y calcular la socavación que produciría esta crecida en el cauce.
6. Estudios hidráulicos, para diseñar las obras como vertederos, que permitan evacuar sin inconvenientes la crecida con un período de retorno de 1 en 200 años.
7. **Dimensionar las obras** de escurrimiento superficial y subterráneo.
8. **Calcular estructuralmente las obras dimensionadas**, para asegurar su estabilidad ante dichas crecidas y eventos sísmicos.
9. **Determinar el presupuesto** de construcción de las obras diseñadas.
10. **Realizar un video virtual** que indique en forma simple, el funcionamiento teórico de cosecha de aguas lluvias tanto, en la interceptación y acumulación superficial del escurrimiento de aguas lluvias como, su interceptación subterránea y recarga de los acuíferos naturales.

Para la selección de microcuencas se utilizó un software computacional del Modelo Digital de Elevación (MDE), adecuado para estos efectos, seleccionando el modelo Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Los criterios de selección de microcuencas derivan de la información generada a partir de la etapa de caracterización, los cuales fueron:

Primer criterio: basado en la localización de las microcuencas, tomando en consideración atributos relacionados con:

- a. **Tipo:** La microcuenca debe ser de tipo captación, excluyendo a las cuencas intermedias y costeras. Se aplica este criterio debido a que se busca intervenir una zona de inicio de cauce.
- b. **Hidrografía:** En esta etapa se descartan las microcuencas que están en un río o estero, debido a que no se pretende intervenir áreas con derechos de aprovechamiento, siendo las cuencas con quebradas o quebradas intermitentes las que continúan con el proceso de selección.
- c. **Agricultura:** Este criterio descarta microcuencas que presenten agricultura convencional, se seleccionan las zonas donde hay agricultura no convencional (de secano) o zonas no agrícolas en favor del objetivo social de este estudio.

Segundo criterio (pendiente de la microcuenca): Se analizaron las áreas que abarcan la sumatoria de las pendientes ligeras a moderadas (categorías 0-2%, 2-5% y 5-9%) en cada piso altitudinal.

Tercer criterio (comunidades agrícolas): Seleccionar las microcuencas, cuya extensión se encuentre exclusivamente bajo el área de una comunidad agrícola.

Cuarto criterio (Validación en terreno y autorización de las comunidades agrícolas): Finalmente, se visitaron las microcuencas seleccionadas para validar la información generada a partir de la metodología antes señalada. Para ello, se generó un set de cartografía con todas las capas utilizadas más la información detallada de cada microcuenca para realizar un recorrido en terreno e interactuar con los actores sociales de cada una de las áreas de estudio. De las directivas de las Comunidades Agrícolas, se requirió por parte de los integrantes de las Comunidades Agrícolas involucradas, su autorización para utilizar parte de sus terrenos para desarrollar el estudio de Cosecha de Aguas Lluvias.

Con base en la modelación de todas las microcuencas estudiadas se seleccionaron 3, una por cada secano en las provincias estudiadas (2 en Provincia de Limarí y 1 en Choapa). Adicionalmente se hicieron las caracterizaciones sociodemográficas, ambientales, productivas y de las Comunidades agrícolas existentes en las Comunas de Ovalle, Combarbalá y Canela en donde se localizan las microcuencas, además de identificar los Comités de Agua Potable Rural (APR), existentes en dichas comunas.

La topografía, es uno de los antecedentes base del proyecto, así como los antecedentes hidrológicos y estudios geofísicos. Se materializaron en terreno dos Puntos de Referencia (PR) en cada topografía desarrollada para las microcuencas seleccionadas y se efectuó una monografía de cada punto de referencia.

Se elaboraron los planos, productos de la topografía, y se complementaron con los planos de diseño de las obras y perfiles para calcular el movimiento de tierra para la instalación de la lámina HDPE y la capacidad de acumulación de cada obra.

El análisis hidrológico desarrollado corresponde a la estimación de los caudales medios mensuales y caudales máximos instantáneos de crecidas para 3 microcuencas de régimen de escorrentía intermitente, ubicadas en las comunas de Canela, Combarbalá y Ovalle, de la Región de Coquimbo, y que son denominadas Los Rulos, La Moralina y Peñablanca, respectivamente. Los caudales medios mensuales fueron estimados para un período estadístico de 35 años en su condición natural, mientras que los caudales de crecida se determinarán para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años.

Para llevar a cabo el estudio hidrológico e hidráulico de las cuencas de interés, se recopiló un conjunto de series estadísticas, correspondientes a información pluviométrica registrada históricamente en las estaciones meteorológicas existentes en la zona de estudio y que son operadas por la Dirección General de Aguas (DGA), información cartográfica y antecedentes geomorfológicos de las cuencas de interés

Las cuencas de las 3 quebradas de estudio no cuentan con estaciones pluviométricas que permitan tener registros de los caudales de éstas y además corresponden a quebradas de escorrentía intermitente de régimen netamente pluvial, por lo que se determinaron las escorrentías y cálculo de crecidas con información estadística de precipitaciones diarias, mensuales y máximas en 24 horas registradas en las estaciones pluviométricas que forman parte de la red hidrometeorológica que controla la DGA.

Como parte del análisis hidrológico, con base en una metodología que describe el documento de manera detallada, se realizó posteriormente la estimación de caudales medios mensuales en las microcuencas seleccionadas, el análisis de la escorrentía superficial, la escorrentía superficial mensual, la estimación de caudales de crecidas en las cuencas de interés, el análisis de precipitaciones máximas anuales en 24 horas, las precipitaciones máximas anuales en las cuencas de interés, el análisis de crecidas en las cuencas de interés.

Los resultados del análisis hidrológico de crecidas desarrollado para una duración de tormenta de 24 horas y para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años, fueron los siguientes (Ver Tabla 17).

Tabla 17. Caudales Instantáneos Máximos de Crecidas [m³/s] Sectores de Interés

| T [años] | Sector | | |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| | Los Rulos | La moralina | Peña Blanca |
| 2 | 2,6 | 4,3 | 0,8 |
| 5 | 8,1 | 17,2 | 2,7 |
| 10 | 12,5 | 28,2 | 4,4 |
| 20 | 17,2 | 39,9 | 6,1 |
| 50 | 23,6 | 56,2 | 8,6 |
| 100 | 28,5 | 68,6 | 10,6 |
| 200 | 33,5 | 81,4 | 12,7 |

Nota: Se ha efectuado en negrita, los caudales máximos instantáneos para un período de retorno de 1:200 años para cada sector, que corresponden a los caudales a considerar para el dimensionamiento de las obras y los cálculos estructurales

Se efectuó un estudio geofísico en las tres microcuencas seleccionadas para el Estudio Cosecha de Aguas Lluvias en Áreas de Secano, Región de Coquimbo.

Los estudios fueron enfocados a la obtención de un modelo estratigráfico de cada sector hasta una profundidad de investigación de al menos 15 metros y a la identificación de posibles acuíferos, para lo cual se ejecutaron medidas geofísicas de resistividad eléctrica en la modalidad de Sondajes Eléctricos Verticales (SEV), que es la técnica clásica y más precisa para definir la estratificación del terreno en términos de la resistividad eléctrica. Este último parámetro asociado a las distintas formaciones y su saturación con agua.

Los resultados de los estudios indican la detección de capas con resistividades eléctricas asociadas a material medianamente saturado en los sectores Peña Blanca y La Moralina, lo que sugiere la presencia de posibles acuíferos en profundidad.

Con base en el estudio realizado en los tres sectores se estableció como conclusión lo siguiente:

Sector Peña Blanca: Es importante señalar que tomar la determinación de impermeabilizar hasta 5 metros de profundidad, se debe a dos consideraciones, una técnica, que es la anteriormente señalada y otra económica, que es el alto costo de movimiento de tierra que se tendría al excavar un terreno arcilloso saturado.

Sector Los Rulos: De acuerdo a la interpretación geofísica realizada, no sería recomendable poner una lámina impermeable hasta el basamento rocoso, ya que a partir del segundo estrato hasta el basamento rocoso, se han detectado la presencia de bolones dispersos que elevarían los costos de movimiento de tierra y tal vez sería preferible que la impermeabilización sea adecuada realizarla solo en los 5 primeros metros de profundidad y crear una condición de recarga forzada de la napa a partir de los 5 metros de profundidad.

Sector La Moralina: De acuerdo con la interpretación geofísica realizada, sería recomendable poner una lámina impermeable hasta unos 5 metros de profundidad, a pesar de la presencia de bolones dispersos, considerando que la profundidad del primer estrato es baja y que en el tercer estrato tendríamos arenas saturadas.

El Gráfico 22, el Gráfico 23 y el Gráfico 24, muestran esquemas de las microcuencas en los sectores seleccionados:

Gráfico 22. Sector Peña Blanca



Gráfico 23. Sector microcuenca la Moralina



Gráfico 24. Microcuenca Los Rulos



El análisis hidráulico desarrollado en el estudio incluye los sectores de emplazamiento de los muros de intercepción superficial de aguas lluvias proyectados en los cauces de interés, considerando tramos que varían entre los 480 y 1,048 m de longitud, aproximadamente, según los antecedentes topo – batimétricos.

Por su parte, el diseño de las obras de intercepción (correspondientes a gaviones) debe responder a dos consideraciones importantes:

- El objetivo principal es que las estructuras sirvan como interceptores de la escorrentía superficial, de manera que permitan acumular aguas lluvias y favorecer la infiltración, razón por la cual su diseño debe asegurar la obstrucción total del cauce en los sectores de emplazamiento.

- A su vez, las obras deben funcionar como vertederos, capaces de evacuar la crecida de diseño de período de retorno $T=200$ años. En estos casos, el diseño tipo adoptado corresponde a vertederos de cresta ancha y horizontal.

Se realizaron análisis hidráulicos sin proyecto, es decir, escurrimiento en condiciones naturales y con proyecto, incluyendo las obras de intercepción del escurrimiento del flujo superficial en cada una de las microcuencas. Para la condición con proyecto, se consideraron las características técnicas de las obras proyectadas, consistentes en muros interceptores de gaviones de malla metálica, de forma rectangular, rellenos de material granular y de altura variable según el cauce de estudio. Estos muros presentan una elevada resistencia, son flexibles y soportan movimientos diferenciales sin pérdida de eficiencia. Además, su construcción es simple y económica y su uso ha presentado excelentes resultados en la contención de suelos y obras fluviales.

Se realizaron los estudios de mecánica fluvial desarrollados para disminuir la erosión retrógrada y desestabilización del lecho en torno a los gaviones proyectados, permitiendo definir las cotas mínimas de instalación y la longitud de las sábanas de protección aguas abajo de los gaviones, mediante análisis de socavación al pie de barreras vertedoras.

En el estudio se realizó el análisis hidrológico operacional, estableciendo las capacidades de acumulación de agua determinadas por las obras diseñadas en cuadros que resumen para cada obra, además usando los caudales de escorrentía determinados en hidrología, para un período de 35 años (Temp 1979-1980 a 2013-2014), se determinaron los volúmenes mensuales que se generan teóricamente, y se estableció la hipótesis que el agua acumulada en cada escorrentía, generada por la lluvia, se infiltra antes de la ocurrencia de la próxima precipitación, efectuó una simple simulación hidrológica operacional de estas obras para determinar los volúmenes anuales que se habrían acumulado en el período de 35 años simulado y que pasarían a recargar los acuíferos naturales.

No obstante, los volúmenes de agua que teóricamente pueden acumular las obras diseñadas, la escorrentía determinada en los 35 años estudiados es mayor a la capacidad de retención de las obras, generándose importantes excedentes anuales. Dependiendo de las condiciones topográficas de cada uno de los sectores, es posible que puedan diseñarse obras complementarias para captar parte de estos excedentes optimizando la cosecha de aguas lluvias para cada sector.

Las obras diseñadas se sometieron a un cálculo estructural para dimensionar definitivamente cada una de ellas, considerando que deben resistir el empuje del agua y condiciones sísmicas altas, sismo grado 6,9 de la escala de Richter.

Las dimensiones de las presas han sido definidas por el estudio hidráulico, acorde a las características la zona y necesidades del proyecto, por lo que los diseños estructurales calculan la longitud de los gaviones para asegurar su estabilidad estática y sísmica, y cumplir con la geometría ya definida. Se tuvieron todas estas consideraciones que permitieron diseñar los gaviones.

El diseño de las obras de intercepción del flujo de aguas lluvias contempla como obra complementaria, la instalación de una tubería de drenaje a ubicarse al pie de la lámina HDPE, con el objeto de captar parte del agua que se infiltrará y conducirla a un costado de la quebrada hacia un pozo construido con tubería de HDPE, de baja presión, reforzada, que cumpla la doble función para extraer el agua o para medir la altura de agua de la napa.

Con este pozo lateral, se podrá medir la altura de agua en la napa y su descarga natural hacia acuíferos de cota más baja.

La tubería horizontal de drenaje se ha considerado que sea de tipo topdren de drenaflex, de 500 mm de diámetro. La tubería vertical, que servirá de pozo y piezómetro, se ha considerado que sea una tubería tipo ADS, corrugada de 500 mm.

El estudio incluye una proposición metodológica para el diseño de estas obras, resaltando los aspectos técnicos que se deben considerar para el diseño adecuado de las obras de intercepción del flujo superficial y subterráneo del escurrimiento de aguas lluvias.

Aspectos financieros

Los presupuestos de las obras a construir en las microcuencas seleccionadas en este estudio se calcularon realizando análisis de precios unitarios y cotizaciones de los elementos a utilizar y la maquinaria, puesta en la plaza de Ovalle.

Los presupuestos generales de las obras diseñadas son los siguientes:

Tabla 18. Resumen de costos de la construcción de obras cosecha de aguas Lluvias – Valores Totales (IVA Incluido)

| Obra | Peña Blanca La Isla (\$ USD) | Canela Alta Los Rulos (\$ USD) | Manquehua La Moralina (\$ USD) |
|--------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Muro 1 | \$ 45.524 | \$ 95.318 | \$ 97.605 |
| Muro 2 | \$ 44.769 | \$ 85.795 | \$ 99.618 |
| Muro 3 | \$ 97.571 | \$ 68.149 | \$ 59.581 |
| Total | \$ 187.891 | \$ 249.262 | \$ 256.804 |

Las conclusiones del estudio señalan:

El estudio se desarrolló con el objeto de diseñar obras de intercepción del flujo superficial y subterráneo del agua generado por las precipitaciones, teniendo como idea principal, retener pequeños volúmenes de agua, forzarlos a infiltrarse y generar la recarga de los acuíferos naturales (napas) o conformación de embalses subterráneos en zonas donde no hay buenas retenciones de agua.

Se utilizó una metodología de diseño que permite dimensionar las obras, calcular estructuralmente su estabilidad, determinar su capacidad de acumulación y cuantificar mediante análisis hidrológico operacional sus capacidades teóricas de acumulación de agua.

La estructura de las obras se definió con base en gaviones que se complementan con la aplicación de láminas de polietileno de alta densidad (HDPE), que, al quedar protegidos contra los rayos ultravioleta de la luz solar, aseguran una vida útil superior a 15 años. La aplicación de la lámina HDPE, impermeabiliza la barrera de gaviones, por lo cual se decidió continuar con su instalación en el interior del suelo, en el mismo sentido de la barrera de intercepción superficial, es decir, perpendicular al flujo de agua, hasta una profundidad de 5 metros. Este tipo de obra permite interceptar el flujo superficial y subterráneo del agua hasta una profundidad de 5 metros, obligando con ello al recurso hídrico, infiltrarse y recargar artificialmente los acuíferos naturales.

De acuerdo con los cálculos realizados, estas obras permitirán retener escurrimiento de aguas lluvias, generados por bajas precipitaciones, lo que hace que funcionen prácticamente todos los años y se genere una recarga permanente de los acuíferos, incluso en los períodos de muy baja precipitación. Para demostrar esto, se realizaron simples simulaciones hidrológicas, haciendo funcionar teóricamente las obras por un período de 35 años, pudiendo demostrarse su funcionamiento constante y permanente en cada temporada agrícola.

El estudio corresponde a una investigación aplicada a desarrollar en tres etapas. La primera etapa corresponde al diseño de las obras; la segunda a la construcción de las obras diseñadas y la tercera de evaluación operativa de las obras.

Del proyecto se desarrolló la primera etapa de diseño de las obras de intercepción del flujo superficial y subterráneo del agua generado por las precipitaciones, pero como se señaló inicialmente no se ha ejecutado aún.

Reúso Industrial

Planta de tratamiento de aguas residuales Aguas Chañar

Ubicación

La planta de tratamiento se encuentra ubicada en la ciudad de Copiapó Atacama al norte de Chile, donde la situación de disponibilidad del recurso es crítica.

El Río Copiapó cruza la capital de la Región de Atacama, donde la escasez del agua es un problema debido al uso indiscriminado del agua por parte de cultivos de riego y minería. Es por esto, que se han implementado una serie de medidas para proteger las aguas subterráneas, entre ellas, haciendo mayor uso de las aguas servidas tratadas.

La situación crítica de esta región en cuanto a disponibilidad del recurso hídrico impulsó a la empresa sanitaria Aguas Chañar, en 2008, a concretar la venta de aguas residuales tratadas a la minera Candelaria, filial de Freeport-McMoRan Copper & Gold (FMI).

Aspectos técnicos

Las aguas servidas tratadas son transportadas desde la planta de tratamiento de Aguas Chañar a través del acueducto Chamonate Candelaria, desde la cota 365 msnm, el cual fue aprobado ambientalmente mediante Resolución Exenta N° 273/2008 por la COREMA (Comisión Regional del Medio Ambiente) de la Región de Atacama.

Se realiza el suministro continuo de aguas tratadas desde la Planta de tratamiento de aguas servidas de la empresa Aguas Chañar S.A. a un Estanque de acumulación de agua de 1800 m³. Este estanque recibe 175 l/s de agua, que es transportada a través del sistema de bombeo y líneas de impulsión hasta un estanque de agua de proceso dentro la faena minera de la Compañía Contractual Minera Candelaria (CCMC.) (Fundación Chile, 2016)

Para el año 2017, el volumen promedio total de agua proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de Aguas Chañar a la empresa minera fue de 345,491 m³ equivalente a un caudal promedio de 130.56 l/s.

La planta de Aguas Chañar cuenta con un proceso de Lodos activados que se encuentra descrito en la Tabla 19.

Tabla 19. Procesos PTAR Aguas Chañar

| Etapas | Función | Unidad |
|-------------------------------------|--|--------------------|
| Tratamiento Primario | Remoción de sólidos, gruesos y finos | Cámara de Rejas |
| | | Desarenador |
| Tratamiento Secundario | Degradación de carga orgánica | Reactor Biológico |
| Sedimentación Secundaria | Sedimentación de lodo por gravedad y clarificación de agua | Clarificador |
| Deshidratado y Disposición de Lodos | Estabilización, espesamiento y deshidratación de lodo | Digestor |
| | | Filtro de Banda |
| | | Canchas de Mezcla |
| Desinfección | Destruir organismos patógenos (Coliformes Fecales) | Cámara de Contacto |

Fuente: Iribarren, C. (18 de diciembre de 2013). Planta de Tratamiento de Aguas Chañar. Obtenido de <https://prezi.com/cgkbnbggy-xzo/planta-de-tratamiento-de-aguas-chañar/>

La Minera Candelaria igualmente cuenta con una planta desalinizadora dentro de sus instalaciones, que en una primera etapa contempló una producción de 300 L/s de agua. Esta planta es la primera instalación de este tipo que se construyó y entró en operaciones en Atacama para uso industrial.

Desde el año 2013 la minera expandió su planta para producir 500 L/s de agua desalinizada de calidad Industrial, que corresponde a la capacidad de diseño. Con esta planta, la compañía dejó de extraer agua de la cuenca del río Copiapó. (Guía Minera de Chile, 2018).

El proceso de desalinización de la plana se lleva a cabo a través de ósmosis inversa, que inicia con la captación de agua de mar con una velocidad de 0,5 m/s. Esta agua es impulsada a un depósito de captación cerrada donde se le agregan aditivos, posteriormente es impulsada nuevamente a un segundo depósito donde se eliminan los sólidos por medio de un reactivo que facilita su separación. (Candelaria Runden Mining, 2017).

El agua resultante ingresa a las etapas de pre - filtrado, ultra - filtrado y micro - filtrado, pasa por el proceso de ósmosis inversa que se realiza en paralelo. El agua micro filtrada es sometida a altas presiones para disminuir su salinidad.

El agua ya desalinizada se remineraliza y se traslada al estanque de almacenamiento, para ser posteriormente transportada conjuntamente con las aguas servidas tratadas provenientes desde la Planta de Tratamiento de Aguas Chañar S.A., a través del acueducto Chamonate – Candelaria pasa abastecer las

operaciones de la empresa minera que se encuentran a una distancia de 100 km. (Candelaria Lundin Mining, 2017)

La Minera Candelaria es un ejemplo de una gestión hídrica eficaz, ya que ha permitido a la compañía eliminar el consumo de agua fresca de la cuenca del río Copiapó para su proceso productivo, mediante el aumento del uso de agua reciclada y fuentes hídricas sustentables.

Este proceso de reúso se dio debido al impacto de la cuenca del río Copiapó por las actividades agrícolas, industrial y doméstico que se desarrollan en la zona, lo que disminuyó la disponibilidad de agua para las actividades desarrolladas por la minería.

La estrategia de manejo de recursos hídricos en la Minera Candelaria se basa en el concepto de "Cero Descarga", que le permite reutilizar más del 82% de agua en sus operaciones, un 16% proviene de agua desalinizada y un 3% a aguas tratadas. (Candelaria Lundin Mining, 2017).

Aspectos financieros

El proyecto demandó una inversión aproximada de USD\$330 millones.

Aspectos Institucionales

Los principales actores públicos involucrados en la gestión de aguas en Chile y sus funciones y facultades se describen a continuación²⁹:

Dirección General de Aguas (DGA): Ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Es una dirección dependiente del Ministerio de Obras Públicas, cuya misión general consiste en *"promover la gestión y administración del recurso hídrico en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación eficiente, como también de proporcionar y difundir la información generada por su red hidrométrica y la contenida en el Catastro Público de Aguas con el objeto de contribuir a la competitividad del país y mejorar la calidad de vida de las personas"*.

Este organismo es la principal autoridad competente en materia de aguas en el país, toda vez que el Código de Aguas y demás legislaciones en la materia, le han encomendado las funciones de planificación del aprovechamiento de los recursos hídricos terrestres, de constitución y administración de los derechos de aprovechamiento de aguas, de policía y vigilancia de las aguas, de supervigilancia

²⁹ Duhart Vera, D. (2016). La institucionalidad de la gestión del agua en Chile. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/143560>

del funcionamiento de las juntas de vigilancia, así como la investigación y medición de los recursos hídricos entre otras labores.

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS): Fue creada en 1989 como un servicio descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio, sujeto a la supervigilancia del presidente de la República a través del Ministerio de Obras Públicas. La entidad está conformada por el Superintendente de Servicios Sanitarios, que ejerce la jefatura, y por cuatro unidades, una fiscalía y tres divisiones, incluida la división de Fiscalización que cuenta con oficinas regionales en todas las regiones del país.

A este organismo le corresponde la fiscalización de los prestadores de servicios sanitarios, del cumplimiento de las normas relativas a servicios sanitarios y el control de los residuos líquidos industriales que se entregan a las empresas sanitarias, de inspeccionar las obras de infraestructura sanitaria que se efectúen por las empresas prestadoras.

Subsecretaría de Defensa: Órgano de colaboración del Ministro de Defensa en asuntos de política de defensa. Parte de sus funciones están vinculadas con la gestión del agua, toda vez que le corresponde ejercer el control, la fiscalización y la supervigilancia de toda la costa y mar territorial de la República, así como de los ríos y lagos que son navegables por buques de más de 100 toneladas.

Comisión Nacional de Riego: Está compuesta por un Consejo y una Secretaría Ejecutiva. El Consejo es presidido por el Ministro de Agricultura, e integrado por los Ministros de Economía Fomento y Reconstrucción, Hacienda, Obras Públicas y Desarrollo Social. La Secretaría Ejecutiva funciona en cuatro Departamentos, que se encargan de ejecutar los acuerdos adoptados por el Consejo.

El objetivo de la Comisión Nacional de Riego consiste en “asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país y la administración de la Ley de Fomento al Riego”, para lo cual actualmente se encuentra trabajando en “la formulación, implementación y seguimiento de una Política Nacional de Riego que genere estudios, programas, proyectos y fomento al riego y drenaje, que contribuya al uso eficiente del recurso hídrico en riego, que propendan a mejorar la seguridad del mismo y aporte al desarrollo de la agricultura nacional, en un marco inclusivo, participativo, sustentable y equitativo de los/as agricultores/as y de las organizaciones de regantes”.

Servicio Agrícola y Ganadero: Servicio descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio, que se encuentra sometido a la supervigilancia del presidente de la República a través del Ministerio de Agricultura.

El objeto de este organismo consiste en *“contribuir al desarrollo agropecuario del país, mediante la protección, mantención e incremento de la salud animal y vegetal; la protección y conservación de los recursos naturales renovables que inciden en el ámbito de la producción agropecuaria del país y el control de insumos y productos agropecuarios sujetos a regulación en normas legales y reglamentarias”*.

Este servicio público cuenta con una Dirección Nacional encabezada por el Director Nacional, en su calidad de jefe superior, una Subdirección Nacional, un Director Regional en cada región, así como Departamentos, Divisiones y controles fronterizos a través de los cuales opera. Específicamente, la División de Protección de los Recursos Naturales Renovables se encarga de la conservación de la flora y fauna silvestre y mejorar el recurso suelo, con el fin de prevenir la erosión y mantener su productividad, y particularmente de controlar la contaminación de las aguas de riego.

Ministerio de Salud: Está integrado por el ministro, a quien le corresponde la dirección superior del Ministerio, y por la Subsecretaría de Salud Pública, la Subsecretaría de Redes Asistenciales, las secretarías regionales ministeriales, así como divisiones, departamentos, secciones y oficinas en las que organiza su funcionamiento.

Dentro de sus funciones, este Ministerio debe emitir directrices para la formulación de Programas de Vigilancia Regional para el monitoreo de las normas primarias de calidad de las aguas, relacionadas con los niveles aceptados para el consumo de la población.

Ministerio del Medio Ambiente: Es una Secretaría de Estado encargada de *“colaborar con el presidente de la República en el diseño y aplicación de políticas, planes y programas en materia ambiental, así como en la protección y conservación de la diversidad biológica y de los recursos naturales renovables e hídricos, promoviendo el desarrollo sustentable, la integridad de la política ambiental y su regulación normativa”*.

Este órgano es encabezado por el Ministro de Medio Ambiente, y compuesto además por un Subsecretario, las Secretarías Regionales Ministeriales, el Consejo Consultivo Nacional y los Consejos Consultivos Regionales, así como cinco Divisiones.

Servicio de Evaluación Ambiental: Es el encargado de la administración del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), a través del cual se introduce la dimensión ambiental en el diseño y la ejecución de los proyectos y actividades que se realizan en el país. Este sistema permite evaluar y certificar que las iniciativas,

tanto del sector público como del sector privado, se encuentran en condiciones de cumplir con los requisitos ambientales que les son aplicables.

Las funciones que ejerce tienen relación directa con la gestión del agua, toda vez que evalúa proyectos que tienen implicaciones ambientales para determinar si procede autorizarlos mediante el otorgamiento de una Resolución de Calificación Ambiental, en la cual establecen las condiciones de operación necesarias para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental. Esto contempla la consideración de los recursos hídricos como componentes esenciales del medio ambiente, respecto de los cuales los proyectos evaluados pueden tener incidencia.

Respecto a la institucionalidad para el saneamiento de zonas urbanas y reutilización de aguas, recae sobre la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) en el marco de sus funciones de supervisar y fiscalizar a los prestadores de servicios sanitarios, definir las tarifas y actuar como instancia administrativa para resolución de conflictos entre prestadores de servicios y consumidores. Otros actores en la gestión de aguas residuales son:

El Ministerio de Economía, fija los precios regulados por la SISS.

El Ministerio de Obras Públicas: Su función principal es promover el saneamiento rural. Asigna los derechos de agua a través de la DGA. Como se mencionó, la DGA se encarga de velar que el aprovechamiento de los recursos hídricos del país se desarrolle dentro del marco legal vigente y con plena información para los usuarios. En esta perspectiva, debe impulsar la Política Nacional de Aguas que propicie el uso sustentable del recurso y la participación de todos los sectores a través de una gestión integrada a nivel de cuencas.

El Ministerio cuenta con la **Dirección de Obras Hidráulicas**, cuyas funciones principales son: proveer de infraestructura de regadío que permita disponer del recurso hídrico, para incorporar nuevas áreas al riego y/o aumentar la seguridad de riego, de las superficies actualmente regadas, incrementando así, el potencial productivo del sector; proveer de infraestructura de red primaria y disposición final, para la evacuación y drenaje de aguas lluvias, a las áreas urbanas, con el fin de disminuir los daños provocados en ellas; proveer de infraestructura para proteger las riberas de cauces naturales, contra crecidas y para contrarrestar los efectos de los procesos de aluviones, en beneficio de la ciudadanía, y proveer de infraestructura para el abastecimiento de agua potable a las localidades rurales concentradas y semi concentradas, con el fin de contribuir al incremento de la calidad de vida, mediante el mejoramiento de las condiciones sanitarias de este sector.

El Ministerio de Agricultura tiene un mayor protagonismo en el reúso del agua a través del sector de riego, conformado por varias instituciones que le ayudan en esta labor, entre ellas: el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), que fomenta el riego entre el sector de pequeños productores; el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), encargado de investigación y transferencia; el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) responsable del control de la contaminación de las aguas y la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Nacional de Riego. Esta última recibe los lineamientos del Consejo formado por los Ministros de Obras Públicas, Agricultura, Economía, Hacienda y de Planificación y Cooperación, pero funciona esencialmente en el ámbito del Ministerio de Agricultura y está encargada de facilitar el aprovechamiento productivo de los recursos hídricos en la agricultura a través de la coordinación interinstitucional, la implementación de instrumentos de apoyo a las acciones públicas que propicien la construcción y utilización eficiente de las obras de riego y drenaje y administrar la aplicación de la Ley 18.450 de “Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje”.

El Ministerio de Salud, que controla el agua de riego de los cultivos alimentarios y la conservación de las aguas.

El Ministerio de Medio Ambiente que analiza los impactos ambientales relacionados a cada proyecto.

La Fiscalía Nacional Económica, con la vigilancia general de las normas de competencia y los consumidores finales. (SISS, 2014).

Aspectos legales

Chile es un país con niveles importantes de estrés hídrico que van en aumento. Este país se encuentra entre los 30 con mayor estrés hídrico del mundo y para el 2040 tendrá un estrés hídrico calificado como “extremadamente alto” siendo el único país latinoamericano ubicado en ese rango.

El documento Transición Hídrica elaborado por la Fundación Chile señala el reúso de agua tratada como un objetivo que en los escenarios 2030 y 2050 puede ser clave para la sostenibilidad del recurso hídrico en el país. El documento previo de Radiografía del Agua identificó que existe una “brecha hídrica” considerable, es decir, un desfase entre la demanda potencial de agua y la oferta hídrica referencial en las fuentes de abastecimiento. Para 2011 se estimó una brecha de 82,6 m³/s que con las proyecciones actuales se podría aumentar para el 2030 a 149 m³/s.

La legislación chilena no cuenta con una norma específica para el reúso de agua que regule la actividad, sin embargo, existe una norma sobre calidad del

agua de acuerdo con el uso que se le pretenda dar que data de 1978, comparado con otros países de la región que expidieron normas sobre parámetros de calidad de agua mucho después. La Ley 1333 introdujo criterios de calidad de agua de carácter físico, químico y biológico según el uso que se pretenda dar al agua reusada (consumo humano, bebida de animales, riego, recreación y estética y vida acuática). Chile es el país de la región con estándares más estrictos de límites permisibles en cuanto a parámetros físicos y biológicos para el uso del recurso hídrico, sea esta tratada u obtenida mediante otros medios. Se establecen también Límites Máximos Permisibles para concentración de metales pesados y factores de seguridad por presencia de pesticidas, cianuros, tóxicos no acumulativos, tóxicos acumulativos y detergentes. Adicionalmente, Chile cuenta con una clasificación para uso de agua para riego según sus niveles de salinidad y el tipo de cultivo que se pretende regar.

Chile cuenta en la actualidad con 283 plantas de tratamiento de aguas residuales. La totalidad del caudal de agua tratada no se emplea en reutilización y una cantidad importante es enviada al océano vía emisarios submarinos, por lo que se está desaprovechando para otros usos. Una parte importante del agua tratada se emplea en riego o es utilizada indirectamente río abajo al extraer agua del afluyente al que fueron vertidas.

Existe un problema legal y regulatorio respecto de la propiedad del agua residual tratada, pues la Ley 18902 de 1990 señala que “los prestadores de servicios sanitarios abandonan las aguas servidas cuando éstas se evacuan en las redes o instalaciones de otro prestador o si se confunden con las aguas de cauce natural o artificial, salvo que exista derecho para conducir dichas aguas por tales cauces, redes o instalaciones”. Distintas autoridades tienen interpretaciones diferentes de esta cuestión de la propiedad del agua tratada y los agricultores agrupados en la Confederación de Canalistas de Chile y la Sociedad Nacional de Agricultura se oponen a que se entienda que estas aguas son propiedad de las empresas prestadoras de servicios.

La Ley 21075 de 2018 realiza una diferenciación entre aguas negras y aguas grises. Por aguas grises se debe entender “aguas servidas domésticas residuales provenientes de las tinajas de baño, duchas, lavaderos, lavatorios y otros, excluyendo las aguas negras.” Mientras que las aguas negras son aquellas que contienen excretas. Esta nueva norma ha sido calificada como clave en los avances para la reutilización de aguas residuales, pero impuso nuevos retos que no son fáciles de

solucionar y que requieren de nueva infraestructura³⁰, normas y reglamentaciones adicionales³¹.

Esta nueva ley no restringe a los prestadores de servicios públicos el tratamiento de aguas grises, pues establece que el titular de la autorización puede ser una persona natural o jurídica que obtiene la autorización de la autoridad sanitaria para instalar el sistema y se responsabiliza de su funcionamiento. Pero, así como pueden establecerse sistemas de pequeña escala, se habilita a las autoridades para tener la iniciativa de promover o licitar la recolección, tratamiento y reutilización de sistemas de tratamiento de aguas grises que excedan el ámbito domiciliario y que persigan fines de interés público.

A manera de síntesis se destacan los siguientes factores:

- **Regulación fuerte en calidad de los vertimientos:** Chile se destaca por manejar altos estándares legales en la calidad de los vertimientos con exigencias puntuales que superan los parámetros físicos, químicos y biológicos tradicionalmente exigidos.
- **Modificaciones regulatorias para distinguir entre aguas negras y aguas grises:** El avance regulatorio en la distinción entre aguas negras y aguas grises lo convierte en una experiencia interesante y novedosa respecto de los nuevos retos normativos y de infraestructura para su aplicación. El éxito de esta estrategia podría aumentar el reúso de agua para ciertas destinaciones al dividir el líquido desde la fuente según los contaminantes presentes.

Tabla 20. Matriz normativa de las principales leyes de Chile

| Norma | Objeto |
|--|---|
| NCh1333-1978 | Norma de Calidad para el Recurso Agua según el uso dado en el cuerpo o masa de agua usado como receptor. Fija los límites máximos para los diferentes parámetros considerados como requisitos de calidad. |
| Decreto con fuerza de ley No. 1122 de 1981 – Código de Aguas | Regula lo atinente a las aguas y su clasificación en el territorio chileno, así como su régimen de aprovechamiento. |

³⁰ El artículo 7 de la ley señala que las aguas grises deberán conducirse independientemente de las aguas negras y debe contar también con una conexión al servicio público de recolección de aguas servidas o a un sistema particular de aguas servidas para poder evacuarlas en caso de fallas.

³¹ Artículo 3: "El Ministerio de Salud dictará un reglamento que contendrá las condiciones sanitarias que deberán cumplir los sistemas de reutilización de aguas grises, el que establecerá los requisitos o antecedentes adicionales que se deberán acompañar a las solicitudes de aprobación del proyecto y autorización de funcionamiento, según corresponda, tomando en especial consideración su aplicación tanto para área urbana como rural."

| Norma | Objeto |
|---|--|
| Decreto con fuerza de ley No. 382 de 1988 – Ley General de Servicios Sanitarios | Regula los servicios públicos destinados a producir y distribuir agua potable y recolectar y disponer aguas servidas. También regula las relaciones entre los concesionarios de servicios sanitarios y el Estado y los usuarios. |
| Decreto Supremo SEGPRES No. 90/00 | Regula las descargas de aguas residuales a aguas superficiales marinas y continentales. |
| Decreto Supremo 46/2002 | Regula la emisión de residuos líquidos hacia acuíferos, definiendo la calidad de las aguas que potencialmente se utilicen para la recarga artificial de acuíferos. |
| Ley 21075 de 2018 | Esta ley regula la recolección, reutilización y disposición de aguas grises. Establece los requisitos para los sistemas de reutilización de aguas grises y demás disposiciones relevantes para su aprovechamiento. |

Conclusiones

- Las experiencias en materia de reúso de aguas servidas en Chile son escasas. En los últimos años han surgido algunos intentos de implementar proyectos de reúso de aguas residuales tratadas, sin embargo, muchos no han prosperado debido principalmente a la desconfianza sobre la calidad de las aguas recicladas.
- En Chile no hay normatividad sanitaria vigente que regule específicamente el reúso de aguas servidas tratadas, ni tampoco existen restricciones legales para la utilización de aguas de los emisarios y Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas rurales. La regulación que maneja los criterios de calidad del agua residual tratada es la establecida para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluviales mediante la D.S.90/2001.
- Las experiencias documentadas sobre reúso de aguas residuales domésticas están orientadas a la actividad agrícola y a la actividad minera que son, en conjunto con el consumo doméstico los grandes demandantes de agua en Chile.
- La experiencia documentada para el sector agrícola consiste en una planta de aguas residuales provenientes de una población rural de Chile (Cerrillos de Tamaya) que una vez tratadas tienen uso productivo en el riego de cultivos de alfalfa. Se utiliza una planta de lodos activados y se constituye en un referente a nivel nacional y también para la región latinoamericana como

ejemplo de reuso productivo sustentable y replicable. El Proyecto se desarrolló con la intervención de la Fundación Chile con financiación del gobierno regional de Coquimbo.

- La experiencia del sector Minero es un negocio desarrollado entre la empresa sanitaria Aguas Chañar, en 2008, como venta de aguas residuales tratadas a la minera Candelaria, filial de Freeport-McMoRan Copper & Gold (FMI), aprobado ambientalmente por la COREMA (Comisión Regional del Medio Ambiente) de la Región de Atacama. Se utiliza un tratamiento a base de lodos activados con desinfección que se mezcla con agua desalinizada al interior de la mina para el uso en sus procesos, que permite eliminar el consumo de agua fresca de la cuenca del río Copiapó para su proceso productivo. El Río Copiapó cruza la capital de la Región de Atacama, donde la escasez del agua es un problema debido al uso indiscriminado del agua por parte de cultivos de riego y minería.
- Los proyectos de aguas lluvias surgen como una necesidad de suplir las necesidades de agua para la producción de cultivos y para consumo, por los problemas de escasez de agua debido a la falta de precipitaciones, que complica la producción de cultivos y la baja productividad agrícola. Por lo tanto, el aprovechamiento y conservación del recurso hídrico se transforma, además, en una prioridad como medio de subsistencia en las áreas rurales de secano, para satisfacer, en primer lugar, la demanda de consumo humano, y, en segundo lugar, el excedente para la producción agrícola.
- La Dirección General de Aguas (DGA) es el ente rector y máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Es una dirección dependiente del Ministerio de Obras Públicas.
- La institucionalidad para el saneamiento de zonas urbanas y reutilización de aguas recae sobre la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). A este organismo le corresponde la fiscalización de los prestadores de servicios sanitarios, velar por el cumplimiento de las normas relativas a servicios sanitarios y el control de los residuos líquidos industriales que se encuentren vinculados a las prestaciones o servicios de las empresas sanitarias.
- Otras autoridades responsables de la gestión de reuso de agua residual en Chile son la Comisión Nacional de Riego (CNR), el Servicio Agrícola y Ganadero, el Ministerio de Obras Públicas, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Salud y el Ministerio del Medio Ambiente.

- Chile destaca por manejar altos estándares legales en la calidad de los vertimientos con exigencias puntuales que superan los parámetros físicos, químicos y biológicos tradicionalmente exigidos.
- El avance regulatorio en la distinción entre aguas negras y aguas grises lo convierte en una experiencia interesante y novedosa respecto de los nuevos retos normativos y de infraestructura para su aplicación. El éxito de esta estrategia podría aumentar el reúso de agua para ciertas destinaciones al dividir el líquido desde la fuente según los contaminantes presentes.
- El caso chileno es clave para prever los conflictos que se pueden presentar sobre la propiedad del agua tratada. Existe interés de las empresas de cobrar una tarifa por el suministro para cubrir costos del tratamiento, mientras que los usuarios tienen interés en usar esta agua de manera gratuita.

3.2.1.3. Perú

Generalidades

Perú es un país de Suramérica que cuenta con una población de 32.495.500 de habitantes y una extensión de 1.285.215,6 km², distribuidos en 136.232,85 km² (10,6 %) en la región costa, 404.842,91 km² (31,5 %) en la región andina y 754.139,84 km² (57,9 %) en la región amazónica. (Oficina de Información Diplomática, Ficha de País - Perú, 2019).

El territorio del Perú se divide en regiones, departamentos, provincias y distritos, en donde se ejerce el gobierno unitario de manera descentralizada y desconcentrada.

Gráfico 25. Mapa de Perú



Fuente: Oficina de información diplomática, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, Ficha de país Perú, 2019

Disponibilidad y uso de agua

Perú posee una gran diversidad de climas (28 de 32 existentes en el mundo), debido a la presencia de la Cordillera de los Andes, la Corriente de Humboldt (aguas frías presentes de sur a norte hasta la latitud 5°) y la Corriente del Niño

(aguas calientes presentes de norte a sur hasta la latitud 3.2°), que choca en las costas de Piura y Tumbes; a estos accidentes se suma el Anticiclón del Pacífico Sur. El clima del Perú se divide en sus tres regiones naturales. (Oficina de Información Diplomática, Ficha de País - Perú, 2019).

Las aguas superficiales están distribuidas en tres grandes vertientes (FAO, 2015):

- Vertiente del Pacífico. Cubre 278,892 km² (21.7 %), y tiene 53 cuencas hidrográficas
- Vertiente del Atlántico. Ocupa 957,486 km² y está conformada por 44 cuencas que drenan al río Amazonas y
- Vertiente del Titicaca. Alcanza a 48,838 km² y comprende 9 cuencas que descargan sus aguas al Lago Titicaca.

El recurso hídrico es abundante en la vertiente Atlántica y escaso en las vertientes del Pacífico y del Titicaca. La disponibilidad de agua de fuentes superficiales a nivel nacional se estima en 2´046.000 Hm³. (CEPAL, 2000)

La mayoría de los ríos del país están contaminados por el vertimiento incontrolado de elementos y sustancias nocivas, proveniente de las descargas de usos minero metalúrgico, doméstico, industrial, agrícola y de la explotación de hidrocarburos.

Tabla 21. Disponibilidad y usos de agua en Perú

| Variable | Año | Valor | Unidad |
|--|------|--------|-----------------------------------|
| Recursos hídricos | | | |
| Precipitación anual promedio | 2014 | 2.184 | Milímetros de agua (mm) |
| Recursos hídricos renovables totales | 2014 | 1.880 | Millones de m ³ al año |
| Recursos hídricos renovables por persona | 2014 | 59.916 | m ³ /hab/año |

FAO. (2013). Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Producción de aguas residuales y su tratamiento

Perú genera aproximadamente 2.217.946 m³ por día de aguas residuales descargadas a la red de alcantarillado de las EPS Saneamiento y el 32% de estas recibe tratamiento. (OEFA, S.f)

Perú tiene 306 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de las cuales 255 corresponden a lagunas de estabilización (siendo 162 de ellas

conformadas por lagunas primarias y secundarias, y 93 por solo lagunas primarias) y otras 34 trabajan con lagunas anaerobias, seguidas por facultativas y de pulimento. Finalmente, otras 17 plantas están aplicando la tecnología de lodos activados.

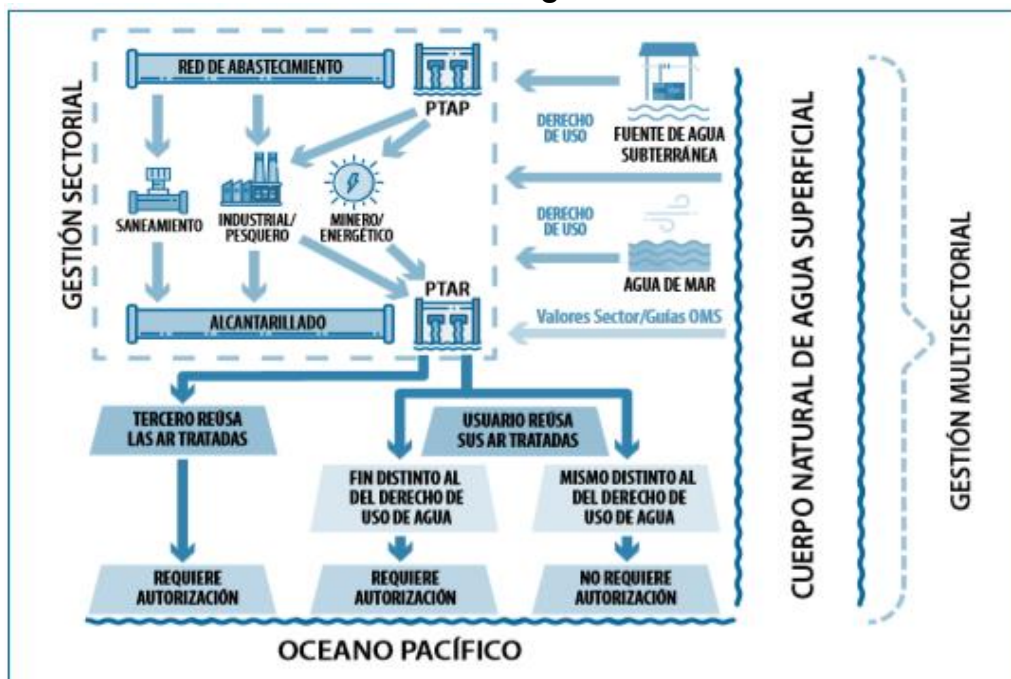
Según la Autoridad Nacional del Agua, anualmente, se vierte sobre los cuerpos de agua 433.68 hm³ /año en promedio de aguas residuales tratadas. Siendo los sectores minería, saneamiento y energía, los que emiten mayor descarga de agua residual tratada, con 55%, 34.86% y 6.97%, respectivamente.

El volumen total de reúso entre el periodo 2009-2017 fue de 126.79 hm³ a nivel nacional, correspondiente al 4% de las aguas residuales tratadas.

Descripción del(os) Proyecto(s)

El reúso en Perú está regulado por la ANA (Autoridad Nacional del Agua), El Gráfico 26 muestra el proceso para el Reúso del agua residual tratada en el ANA. (Aquino Espinoza, 2017).

Gráfico 26. El reúso de las aguas residuales tratadas



Fuente: Aquino Espinoza, P. (2017). Calidad de Agua en el Perú, Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales. Lima, Perú: Derecho, Ambiente y Recursos Naturales (DAR).

El reúso de los efluentes constituye una posibilidad para que algunas de las PTAR en operación puedan cumplir el marco legal peruano. Sin embargo, en cada una se evalúa la relación entre la oferta (efluente de la PTAR) y la demanda para

reúso. En la costa peruana, donde se encuentra el mayor número de PTAR, ocurren precipitaciones naturales mínimas durante todo el año, y existe una demanda potencial en el uso de aguas residuales. (Aquino Espinoza, 2017).

Las aguas residuales en el país se destinan para los siguientes usos:

- Riego
- Recirculación de procesos
- Mitigación ambiental
- Riego y mitigación ambiental
- Limpieza y mantenimiento
- Riego, limpieza y mantenimiento

De estos seis, el uso para el riego representa, el 63.61% del total del reúso de las aguas residuales tratadas en Perú, es decir 80.657 hm³.

Tabla 22. Reúso de las aguas residuales tratadas

| Destino principal del reúso | Volumen total Reúso (hm ³) | Porcentaje (%) | Descripción del reúso |
|---------------------------------|--|----------------|---|
| Riego | 80.657 | 63.61% | <ul style="list-style-type: none"> • Especies forestales de tallo alto. • Áreas verdes (grass, especies arbóreas y ornamentales). • Parques y jardines. • Productos agrícolas como: palma aceitera, maíz y demás productos agrícolas. |
| Recirculación procesos | 34.465 | 27.18% | <ul style="list-style-type: none"> • Recirculación Planta Concentradora. • Lixiviación de procesos. • Lavado de máquinas. • Fines metalúrgicos. • Uso minero (Cerro Verde). |
| Mitigación ambiental | 9.789 | 7.72% | <ul style="list-style-type: none"> • Riego de vías de acceso. • Control de polvo dentro de la instalación y trabajos. • Compactación de tierras. |
| Riego y mitigación ambiental | 1.838 | 1.45% | <ul style="list-style-type: none"> • Uso combinado para riego de áreas verdes, especies arbóreas y control de polvo, no se pudo distinguir cuánto se emplea uno de otro. Combinación de usos. |
| Limpieza y mantenimiento | 0.035 | 0.03% | <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza de servicios higiénicos y limpieza en general de infraestructura. |
| Riego, limpieza y mantenimiento | 0.008 | 0.01% | <ul style="list-style-type: none"> • Uso combinado para limpieza, mantenimiento de la instalación (servicios higiénicos, pisos, etc.) y riego de áreas verdes. |
| TOTAL | 126.792 | | |

Aquino Espinoza, P. (2017). Calidad de Agua en el Perú, Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales. Lima, Perú: Derecho, Ambiente y Recursos Naturales (DAR).

Para la evaluación de solicitudes de autorización del reúso de efluentes tratados, la Autoridad Nacional del Agua verifica el cumplimiento de los valores de las guías de la OMS de 1989 o la versión actual del 2006 (dependiendo de lo indicado en la solicitud de autorización). (Aquino Espinoza, 2017).

Las guías de la OMS de 2006 definen la calidad del agua residual a reutilizar en función de la evaluación del riesgo para la salud de los que participan en la cadena del reúso.

Drenaje agrícola

Proyecto expansión de la Unidad de Producción Cerro Verde (Torreblanca Marmanillo, 2016); (Valverde, 2018)

Ubicación

Arequipa es una ciudad al Sur oeste de Perú, con una población de 1´200,000 de habitantes. Se encuentra ubicada a una altura de 2,300 m.s.n.m. (7,546 ft). La economía se basa en la agricultura, industria, minería, turismo. El clima es Seco (RH 46%; Lluvias 75 mm/año). Arequipa está en la cabecera del desierto de Atacama, el más seco del mundo.

El río Chili, fuente de la vida de Arequipa, cruza la ciudad partiendo de las montañas en la cordillera de Los Andes, y en su recorrido abastece de agua para la población, comercio e industria, así como para la agricultura y ganadería. Irriga alrededor de 26,430 hectáreas de tierras de cultivo y provee de energía a la región a través de 6 centrales hidroeléctricas. Sus aguas no llegan al mar en época de estiaje.

Arequipa en el año 2012 aún tenía 1,3 m³/s de aguas residuales sin tratar con valores de DBO5 > 150 mg/L; DQO > 300 mg/L y Coliformes Termo tolerantes (fecales) > 2.4 x 10⁷.

Aspectos técnicos

La sociedad Minera Cerro Verde (SMCV) y su principal accionista, Freeport-McMoRan, es una Empresa Minera que se dedica a la exploración y explotación de yacimientos mineros, y a la producción y comercialización de cátodos de cobre y de concentrados de cobre y molibdeno. Los yacimientos y las operaciones de Cerro Verde se ubican en los distritos de Uchumayo y Yarabamba, a 30 kilómetros

al sudoeste de la ciudad de Arequipa, región del mismo nombre. La capacidad de producción de cobre en 2012 era de 120,000 Tn. por día.

La SMCV requería hacer ampliaciones de producción para triplicar la producción de Cu. de 120 a 360 millones de Tn. por día, requiriendo como recurso básico 1 m³/s de agua adicional a lo que ya tenían concesionado. Para ello estudiaron varias alternativas de consecución del recurso entre los cuales estaban Agua de mar (planta desaladora), Agua fresca (rio), Agua subsuelo o agua residual tratada, determinando que esta última alternativa era la más viable.

Al respecto se realizaron reuniones entre Directivos de la Empresa de agua de la ciudad (SEDAPAR S.A.), Autoridades Locales, Líderes sociales, el Gobierno (Ministerios – ANA) y los Agricultores, para llegar a acuerdos entre las autoridades y la empresa privada que permitiesen a la SMCV tener acceso al 1 m³/s de agua residual tratada, y que la financiación de los Estudios de factibilidad, la Ingeniería, la Construcción, la Operación y Mantenimiento (O&M) del sistema de tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Arequipa, fueran financiados por SMCV.

La ficha del Proyecto es la siguiente:

| | |
|--|---|
| Capacidad de diseño: 2.4 m ³ /s (207,360 m ³ /día). | Población equivalente: 1.1 millón habitantes |
| Tres etapas: 2029, 2036, 2043 | Tecnología: Filtros Percoladores. |
| Proyección de diseño: año 2043 | CAPEX: US \$ 540 MM |
| Etapas 1: 1.8 m ³ /s año 2029 | Inicio de Operación: 19 de diciembre de 2016 |
| Tiempo de construcción: 30 meses (agosto 2013 a Feb. 2016) | Operación & Mantenimiento: SMCV – Freeport McMoran. Sin costo para la Población |
| | Reúso: 1 m ³ /seg. para operaciones mineras y el resto del efluente se devuelve al río Chili. |

Los componentes del sistema son los siguientes:

- Sistema de recolección de aguas residuales: Alata, Huaranguillo, Arancota, Tiabaya y Congata.
- Estación de bombeo de aguas residuales y obras de llegada.
- Tubería de conducción de aguas residuales a la PTAR La Enlozada.
- Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) La Enlozada para tratar hasta el 100% de aguas residuales de Arequipa Metropolitana.
- Relleno Sanitario donde se depositarán los residuos sólidos

El Gráfico 27 muestra el esquema del sistema total.

Gráfico 27. Proyecto PTAR La Enlozada



Fuente: Valverde, J. (2018). Caso Cerro Verde – Arequipa – Perú. Un Proyecto Ganar – Ganar. PTAR La Enlozada – Recuperación de un río - Reúso de agua. Buenos Aires: TALLER: Agua Residual - De desecho a recurso. Cambiando paradigma.

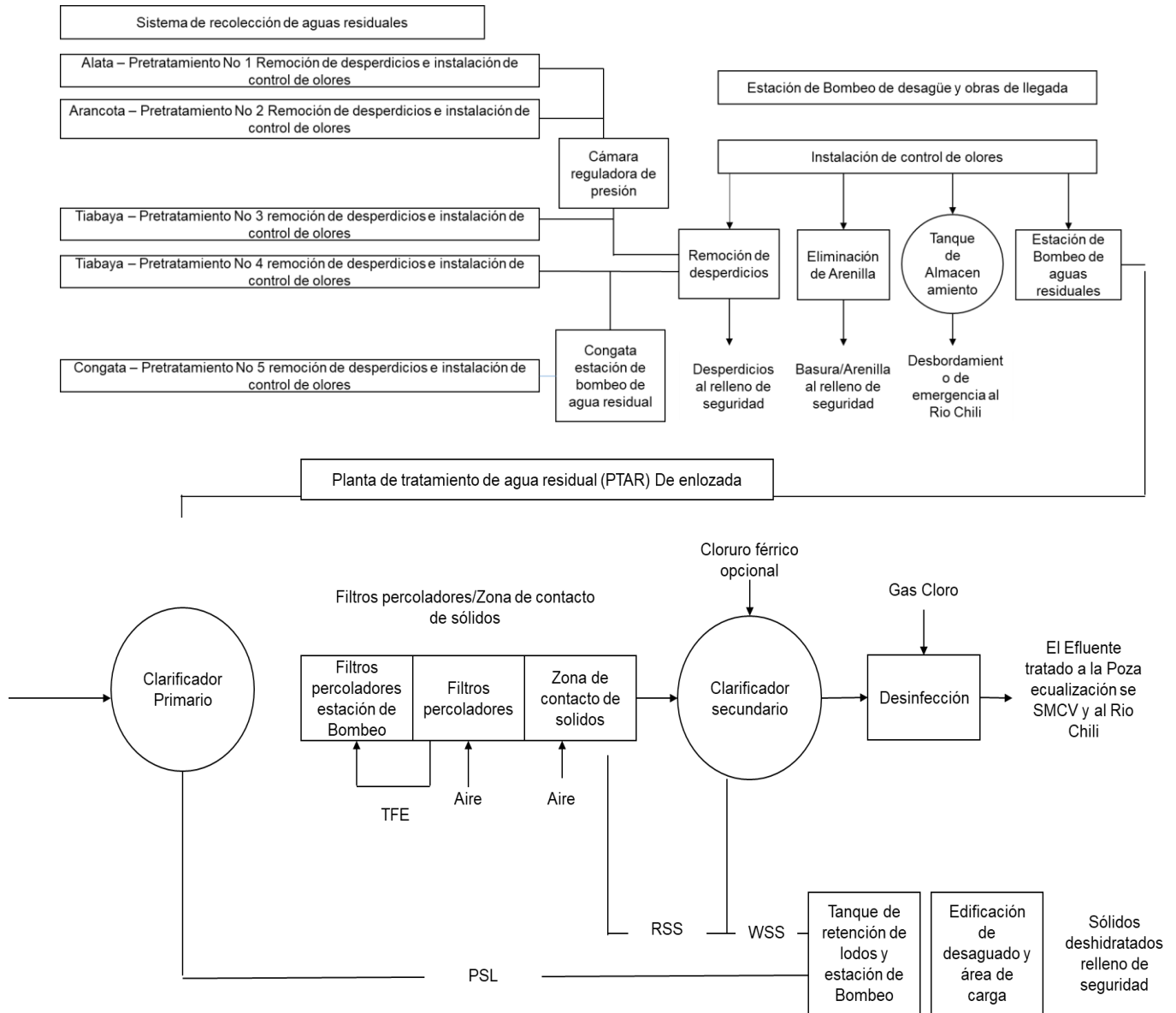
La PTAR de Enlozada consta de los siguientes procesos unitarios³²:

- Tratamiento Primario para la remoción de sólidos sedimentables con sistema mejorado mediante la precipitación química en clarificadores primarios.
- Tratamiento Secundario, que consiste en el tratamiento biológico mediante filtros percoladores, tanques de contacto de sólidos, y clarificadores secundarios para el asentamiento de sólidos secundarios y sedimentarios.
- Desinfección con Cloro, utilizando hipoclorito de sodio para la remoción de patógenos antes de la descarga.

El Diagrama de flujo de todo el Proyecto se muestra en el Gráfico 28

³² Índice de calidad de agua superficial del río Chili en el sector de Sachaca-Tiabaya-Huayco. Velarde Paz, Bianny Gempell. Universidad Nacional De San Agustín. Arequipa 2016. Págs. 30 a 32.

Gráfico 28. Sistema de colección y tratamiento de Aguas residuales PTAR La Enlozada



Fuente: Índice de calidad de agua superficial del río Chili en el sector de Sachaca-Tiabaya-Huayco. Velarde Paz, Bianny Gempell. Universidad Nacional De San Agustín. Arequipa 2016. Págs. 30 a 32.

Dentro de los aspectos a resaltar del Proyecto se consideran beneficios para (tomado literal de Torreblanca Marmanillo, 2016 y Valverde, 2018):

- La ciudad de Arequipa que tendrá un río recuperado.
- Para la agricultura, porque se podrá regar con aguas de calidad y se beneficiará la agroexportación de Arequipa.
- El turismo, porque se recuperarán áreas de esparcimiento.
- El ambiente, porque habrá un impacto positivo en flora y fauna.

- La SMCV a cambio de la financiación tiene disponibilidad de 1 m³/s de agua adicional al que ya dispone y puede triplicar su producción de cobre.

La PTAR empezó a funcionar en diciembre de 2016 y no se tiene información disponible de la calidad del tratamiento implementado en la PTAR de la Enlozada con destino a las minas de Cerro Verde y los excesos al Río Chili. Tampoco se tiene información de la calidad del vertimiento que arroja a los cuerpos de agua la SMCV después que utiliza esa agua tratada en sus procesos.

Existen algunas referencias que señalan características o condiciones de vertimiento cero, que permitirían concluir que no es un caso de Re-contaminación de los cuerpos de agua si se manejan adecuadamente al interior de la Mina. La primera referencia a vertimiento cero lo hace la misma SMCV en su informe de sostenibilidad anual³³ de 2016 cuando señala en el acápite de efluentes que *“Las operaciones de Cerro Verde, que incluyen los componentes que se han integrado a su Unidad de Producción con motivo de Expansión, cuenta con la certificación de vertimiento cero.”*

De igual manera se hace referencia al tema de vertimiento cero por Mercedes Reina Rodríguez en su tesis de maestría de Ingeniería Industrial³⁴ *“El concepto “Descarga cero” implica el tratamiento de todos los desperdicios líquidos del proceso de tal manera que se puedan reintroducir nuevamente en el proceso, minimizando con ello el rechazo final. Dicho de otra manera, los efluentes generados en el proceso no son descargados al medio ambiente o eliminados por métodos convencionales como a través de un alcantarillado, y, mediante una serie de tratamientos consiguen reutilizarlo íntegramente (bien para riego, bien para reintroducirlo en el mismo proceso donde se generó. “*

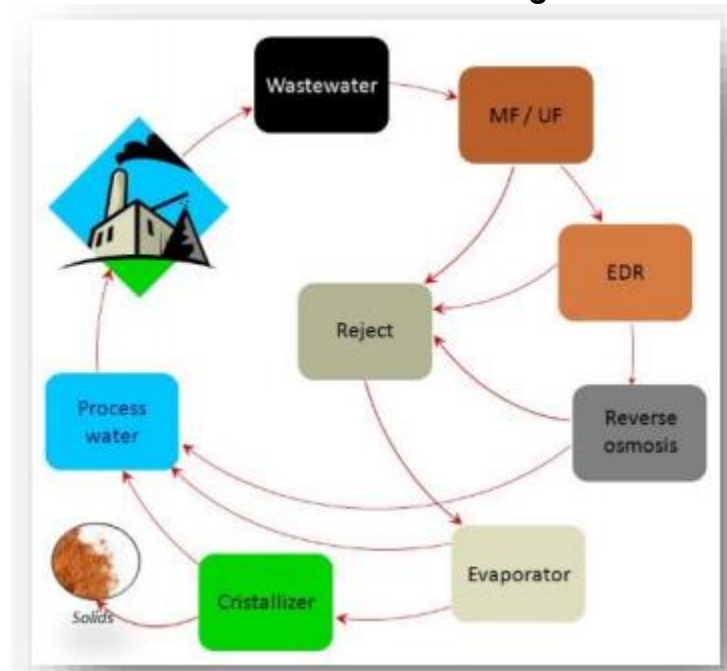
“Como se puede observar en la imagen mostrada a continuación, el ciclo seguido para lograr esta “descarga cero” es normalmente el siguiente (aunque no tiene porqué ser estrictamente así, varía ampliamente de una industria a otra): Primero se aplicaría un pretratamiento (MF o UF), seguido de una nana filtración o una ósmosis (inversa/directa). Tras estos tratamientos “de membrana”, se pasaría a un tratamiento de separación térmica, por el cual se concentrarían aún más los rechazos obtenidos, llegando a un residuo seco, y se obtendría a su vez agua destilada. De esta manera se alcanza el objetivo de descarga cero, pues el único

³³ Reporte de Sostenibilidad Corporativa (10180)- Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.- 2016. <https://responsibleminingindex.org/documents/d102929469ce24aa3b996c7fafa3de012c0f5fa7.pdf> Pg. 22

³⁴ Tratamiento de aguas industriales mineras mediante ósmosis inversa: Aplicación a Perú. Mercedes Reina Rodríguez. Trabajo Fin de Máster. Máster en Ingeniería Industrial. Dpto. Ingeniería Energética Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla 2018. Pg. 16. Tomado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71314/fichero/TFM-1314-REINA+.pdf>

residuo que queda ya no es líquido, pudiendo reintroducirse en el proceso todo el efluente logrado”.

Gráfico 29. Ciclo de descarga Cero



Un ejemplo de mina con “descarga cero” es la de Cerro Verde de Freeport McMoran, situada en Arequipa, al sur de Perú. Dicha mina, en la que extrae Cu y Mo, recicla aproximadamente el 85% del agua del proceso”.

Dificultades y Retos

Es importante resaltar que para este caso de la sociedad Minera Cerro Verde - SMCV el tema del reúso del agua residual tratada en la PTAR de La Enlozada, aún hay aspectos que generan controversia como lo señalan Juan Carlos Soto y Fiorella Montaña en su artículo “Cerro Verde: ¿debe o no pagar por los desagües que usa para sus operaciones mineras?”³⁵ en el que se hace referencia a varios aspectos que están vigentes sobre el aprovechamiento del agua residual tratada:

“Existen quejas de Agricultores y vecinos que viven en la zona aledaña a la planta de bombeo de Cerro Verde, quienes denunciaron que el líquido que debería tratar la empresa minera trae consigo restos de heces fecales y residuos

³⁵ La República. Cerro Verde: ¿debe o no pagar por los desagües que usa para sus operaciones mineras? Carlos Soto. Fiorella Montaña. Junio 23 de 2019. Tomado de <https://larepublica.pe/sociedad/2019/06/23/cerro-verde-debe-o-no-pagar-por-los-desagües-que-usa-para-sus-operaciones-mineras/>.

grasos³⁶, y según los afectados, “se incrementaron los olores fétidos que desprenden las válvulas de desfogue de La Enlozada, y el agua en la Bocatoma de Congata ahora se torna turbia con espuma en la superficie. Los pobladores manifiestan que la minera no estaría tratando el agua que regresa directamente al río. Tanto los agricultores del distrito de Uchumayo y de La Joya, que también se ven perjudicados, piden al gobernador regional, Elmer Cáceres Llica, que exija a Cerro Verde que informe cuánta agua residual está tratando, con cuánta agua tratada se queda y por qué todavía no se descontamina el río al 100”

“El plan inicial era que el costo de operación y mantenimiento de los componentes clave del sistema, incluida la PTAR La Enlozada, los asumía la compañía minera hasta el tercer año, diciembre de 2018. Sin embargo, el quinto convenio determina que Cerro Verde continuará operando la planta de tratamiento y dos componentes más a su costo hasta que haya una ley para fijar la tarifa por la comercialización del agua residual tratada. En otras palabras, Sedapar no podía cobrarle el agua a Cerro Verde mientras no haya tarifa. Ese acuerdo se suscribió en 2012”.

“El congresista Horacio Zeballos e integrantes de la sociedad civil organizada consideran que el quinto convenio favorece ampliamente a la minera. En sus cálculos matemáticos, sostienen que Sedapar pierde por lo menos 2.376.174 USD, renunciando a operar la planta y a cobrar el agua tratada. La aritmética de Zeballos arroja esa cifra aplicando una tarifa de uso industrial. Sedapar y Cerro Verde rechazan ese enfoque. El agua industrial es potable y no es lo mismo que la residual. “Es como querer cobrar por una botella de whisky cuando lo que entregas es una botella de agua”, dice Pablo Alcázar Zuzunaga, gerente de Asuntos Públicos y Comunicaciones de la compañía minera”.

“Por otro lado, del convenio se desprende que la construcción no fue gratuita. El quinto convenio también lo precisa. Cuando Sedapar le imponga una tarifa a la compañía minera, tendrá que considerar la inversión en la planta”. De igual forma, los costos de operación y mantenimiento efectuados hasta que dure el encargo. Ese componente debe considerar la tarifa.”

“Sedapar planteó un octavo convenio: que la minera asuma la operación de la mayoría de los componentes del sistema de tratamiento hasta 2045 a cambio del metro cúbico de los desagües gratuito. La propuesta desató polémica. El alcalde de Arequipa y accionista mayoritario de Sedapar, Omar Candia Aguilar, sostiene que la compañía minera debe pagar por el agua”.

³⁶ PTAR de Cerro Verde vierte agua contaminada al Chili. Diario Los Andes. Mayo 30 de 2019. Arequipa Perú. Tomado de <https://www.losandes.com.pe/2019/05/30/ptar-de-cerro-verde-vierte-agua-contaminada-al-chili/>.

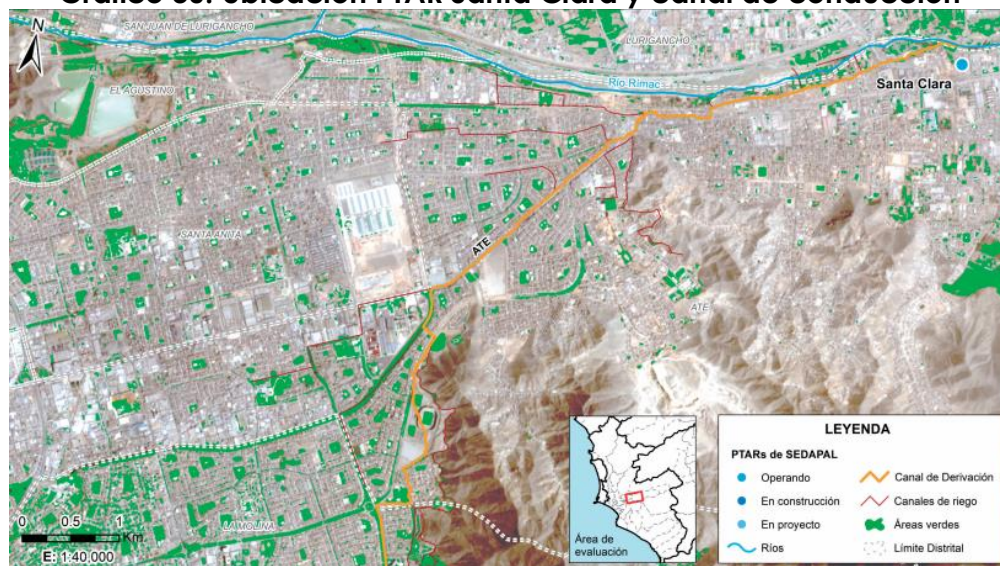
“¿Por qué Sedapar no quiere operar la planta ni cobrar tarifa? Armando Llaza, presidente del directorio de Sedapar, y el gerente Juan Carlos Córdoba, señalan que perderían dinero si asumen esa responsabilidad. Operar La Enlozada cuesta al año, según cifras de Cerro Verde, 18 millones de dólares y la Empresa no cuenta con ese presupuesto. Necesitarían un promedio de 1.500.000 USD al mes. El consultor Willy Zavalaga hizo un estudio de costos y lo máximo que puede recaudar Sedapar cobrándole a la minera por agua residual es 594.043 USD. ¿Cómo cubriría el faltante? La alternativa sería incrementar en 30% las tarifas de agua. Ahí todos los usuarios tendrían que mojarse. Según Llaza, por la inversión en la PTAR, Cerro Verde tendría agua gratis por más de 50 años. ¿Lo inquietante es saber qué ocurrirá en 2045 cuando Cerro Verde deje de operar esa planta? ¿El río volverá a recibir todos los desagües, teniendo en cuenta que Sedapar no tiene plata para sostener un sistema de tratamiento de aguas residuales?”

Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Santa Clara, en la región Lima (Espíritu Limay, S.f)

Ubicación

Santa Clara es una localidad del Distrito de Ate, en la Provincia de Lima, Perú. La PTAR de Santa Clara³⁷ se encuentra ubicada al margen izquierdo del río Rímac (Ver Gráfico 30) en la municipalidad de Ate Vitarte.

Gráfico 30. Ubicación PTAR Santa Clara y canal de conducción



Fuente: Observatorio de Agua. (2017). Análisis Geoespacial de Canales de Riego con relación a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) y Áreas Verdes en el ámbito de Lima Metropolitana. Lima: Cooperación Alemana para el Desarrollo.

³⁷ Tratamiento de aguas residuales en Lima y Callao. Ing. Francisco Quezada Neciosup. Sedapal. Tomado de http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=f0b89290-7e55-43b4-a298-a97d86a03a62&groupId=10154.

Gráfico 31. Panorámica PTAR Santa Clara

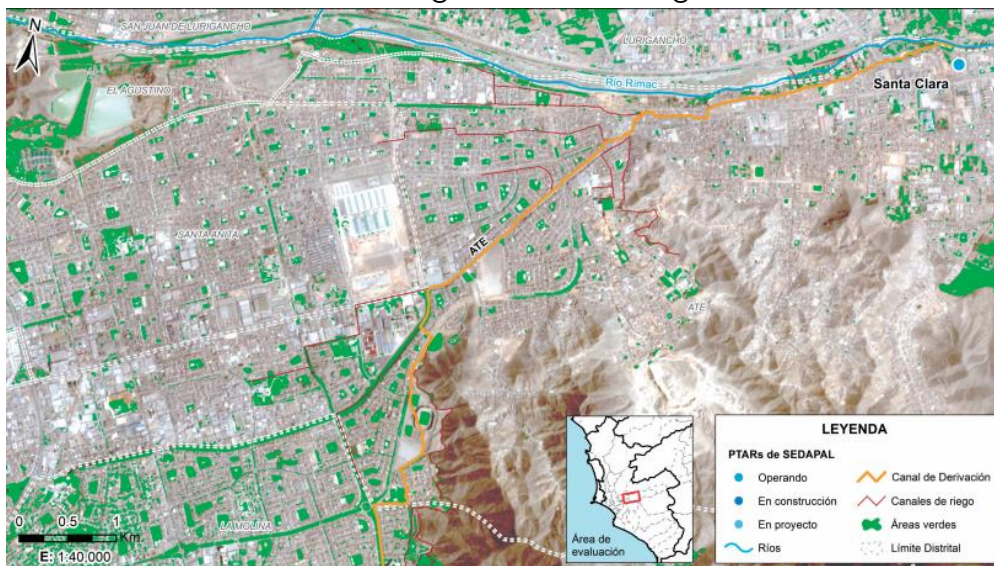


Fuente: Quezada Neciosup, F. (S.f). Tratamiento de Aguas Residuales en Lima y Callao. Lima: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - Sedapal S.A.

Aspectos técnicos

La Capacidad de Tratamiento es de 437,81 L/s equivalentes a 37.826,78 m³/día y emplea la tecnología de lodos activados con aireación extendida.

Cuenta con un sistema automatizado, sistema de deshidratación de lodos por centrífugas, tratamiento terciario por filtración, desinfección con cloro, con vertimiento a canal de riego en una longitud de 13.3 km. El Gráfico 31



muestra

una panorámica de la PTAR.

Mediante la Resolución Directoral N° 32-2013-ANA-DGCRH, se otorgó a SEDAPAL el reúso de las aguas residuales tratadas efluentes de la PTAR SANTA CLAR, cuyo uso efectivo lo realizó la Comisión de Regantes del Sub Sector de Riego de la municipalidad de Ate, por un volumen anual de hasta 13'629.772,80 m³, para fines de riego de cultivos de tallo corto y alto. Esta autorización se dio mediante Convenio firmado entre las partes, por el cual se acuerda el consentimiento de la Comisión de Regantes para permitir la descarga del efluente de la PTAR al canal de riego de Ate y para el reúso de este.

La Comisión de Regantes del Subsector de Riego Ate está conformada por asociaciones de agricultores, instituciones públicas y privadas (centros educativos, universidades, empresas, centros recreacionales, embajadas) y personas naturales. Está conformada por 108 usuarios para un área de 527,61 hectáreas.

Esta comisión usa el agua superficial del río Rímac con fines agrarios con un volumen anual de 12.718.320 m³, sin embargo, este volumen de agua no es suficiente para los procesos agrícolas por lo que requieren un mayor volumen para riego, que es garantizando mediante el reúso de la totalidad de aguas residuales tratadas de la PTAR Santa Clara (437,81 L/s).

El área de riego con el agua de la PTAR es de aproximadamente 334,60 Has, para Vegetales tales como Camote, lechuga, repollo, tomate, cebolla, apio, poro, ajo, papa, culantro, plátano, paca, palta, y otros. Además, se usa para el riego de parques y jardines: ray gras, eucalipto y otros.

A la fecha no se tiene información oficial acerca de la calidad del efluente de agua de la PTAR, la única referencia la entrega Humberto Joseph Bieberach Muguruza, que señala que la PTAR entrega su efluente con una DBO5 menor a 15 mg/l y los coliformes termotolerantes (NMP/100 ml) son del orden de 1.00 E+01 (Moscoso Cavallini, 2011. SIC).

Aspectos financieros

La obra requirió una inversión de \$36.457.300 USD, y beneficia a 64,125 habitantes de 162 asentamientos humanos de los sectores Pariachi, La Gloria, San Juan, Horacio Zeballos y Anexos de Ate Vitarte.

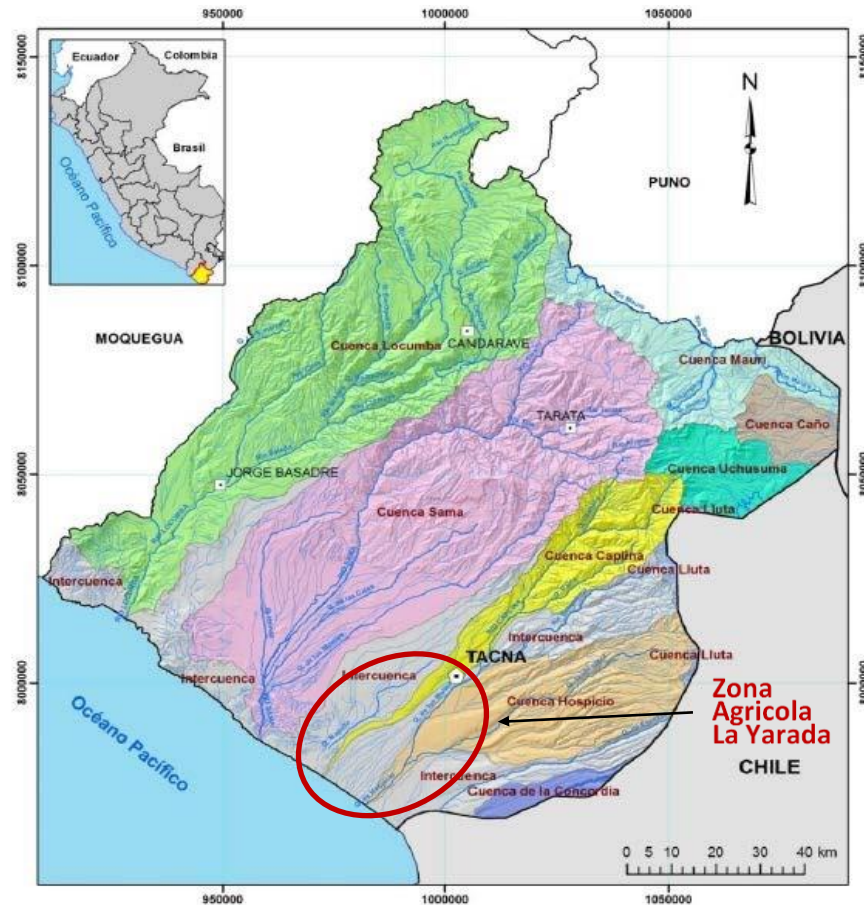
Proyecto Tacna – Planta de tratamiento de aguas residuales - 1³⁸

Ubicación

³⁸ Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I). Diciembre de 2019.

La ciudad de Tacna está ubicada a orillas del río Caplina, en un reducido valle en medio del desierto costero peruano al sur de Perú (ver gráfica 22). La Provincia de Tacna tenía una población de 306.363 habitantes en el censo del año 2017 del Instituto de Estadística e Informática (INEI).

Gráfico 32. Ubicación Tacna



Fuente: Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I).
Diciembre de 2019

El balance hídrico de esta cuenca (Tabla 23) es claramente deficitario en todos los meses del año, contabilizándose un déficit promedio anual de 3.49 m³/s, equivalente a más de 110 hm³/año. Este desbalance entre oferta y demanda es atribuible totalmente al déficit hídrico en el uso del acuífero Caplina para el riego de la zona agrícola de La Yarada, declarada actualmente en veda por sobreexplotación.

Tabla 23. Balance hídrico de la cuenca Caplina (m³/s)

| | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Oct. | Nov. | Dic. | Total Promedio |
|------------------------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|----------------|
| Oferta | 3,38 | 3,77 | 3,57 | 3,25 | 3,17 | 3,18 | 3,15 | 3,06 | 3,00 | 3,12 | 2,88 | 3,15 | 3,22 |
| Demanda | 10,59 | 10,03 | 9,20 | 7,53 | 4,16 | 3,78 | 3,80 | 3,65 | 4,45 | 6,39 | 7,91 | 9,11 | 6,72 |
| Balance Hídrico | -7,21 | -6,26 | - | - | -0,99 | - | - | -0,59 | - | - | - | - | -3,49 |
| | | | 5,63 | 4,28 | | 0,60 | 0,65 | | 1,45 | 3,27 | 5,03 | 5,96 | |

Fuente: Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I).
Diciembre de 2019

La cuenca Caplina no cuenta con regulación propia. En cambio, la cuenca aportante del trasvase del río Uchusuma está regulada mediante los embalses de Paucarani, Condorpico y Casiri, operados en la actualidad por la Junta de Usuarios de Riego Tacna.

Zona agrícola La Yarada

En la zona agrícola de Tacna se maneja alrededor de 20.825 hectáreas de cultivos en 6 zonas agrícolas que conforman la Junta de Usuarios del Valle de Tacna) (ver Tabla 24) . Las comisiones de regantes de Bajo Caplina y Uchusuma se localizan en una zona más elevada de la ciudad y se abastece casi exclusivamente de las aguas del río Caplina. Magollo y La Yarada ubicadas aguas abajo de la ciudad se riegan casi exclusivamente con aguas subterráneas.

Tabla 24. Zona Agrícola de la Provincia de Tacna – Extensión en 2016

| Zona Agrícola de la Provincia de Tacna (Sectores) | Ha |
|---|---------------|
| Bajo Caplina | 1.767 |
| Uchusuma | 918 |
| Arunta (Albarracín) | 242 |
| Magollo | 1.941 |
| <u>Yarada Alta</u> | <u>2.850</u> |
| La Yarada | 13.107 |
| Total | 20.825 |

Fuente: Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I).
Diciembre de 2019

En la zona La Yarada Alta se encuentran las tierras de las asociaciones de regantes que utilizan principalmente las aguas residuales en el riego para fines de reúso. Esta zona presenta una excepción de la práctica general de la sobreexplotación de los recursos hídricos (acuífero Caplina) por fines económicos.

Cultivos principales en el valle de Tacna

Durante los 40 años en que los agricultores de Tacna riegan con aguas residuales, se ha observado una sustitución progresiva de sus cultivos, que inicialmente eran hortalizas (tomate y ají), cereales (trigo y cebada) y forrajes (alfalfa, maíz chala y avena forraje), mientras que ahora la totalidad son tuna para producción de cochinilla (no fruto) y tara, así como olivos y unos pocos árboles frutales (cítricos, higos). Tuna para cochinilla y tara para taninos son cultivos industriales, típicos para la zona costera de Perú. Solo una pequeña extensión se dedica aun al cultivo de maíz chala para forraje (ganadería).

De hecho, este proceso de sustitución de cultivos durante las últimas décadas ha sido propiciado con el propósito de obtener mejoras en los ingresos, además de disminuir los requerimientos de agua y el riesgo sanitario de los productos. A ello se suma un descenso muy importante en el cultivo de olivo durante los últimos años, debido a la presencia de plagas en este cultivo en la región.

La producción de olivo constituye el 56% de la superficie cultivada en la zona agrícola de Tacna, le siguen la alfalfa y el maíz chala con 3.400 hectáreas dedicada a estos forrajes para la producción ganadera. Destaca el cultivo de Tuna para la producción de cochinilla en 1.208 hectáreas regadas básicamente con aguas residuales, siendo la superficie más importante del país dedicada a esta producción.

La provincia de Tacna produce el 53,15% de los olivos (aceitunas) del país y representa el 42% de los ingresos generados por la agricultura local de Tacna. De hecho, se encuentra aceite de oliva de una calidad extraordinaria que se produce en la zona. El orégano de Tacna, igual de famoso en todo el país, representa casi el 8% de estos ingresos, seguidos por el maíz chala y la alfalfa que juntos representan casi el 17% de tales ingresos. La cochinilla para producción del colorante rojo "Carmín" representa casi el 5% de la economía agraria local. No se cultivan plantas de tallo bajo ni hortalizas.

Aspectos técnicos

La ciudad de Tacna tiene una historia importante en el reuso de las aguas residuales en la agricultura. El proceso se inició hace más de 40 años en 1974 mediante un Proyecto Especial de COPARE, respaldado por el Gobierno Peruano y financiado por Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), para la construcción de una planta de tratamiento por lagunas facultativas y la habilitación de 400 hectáreas para la actividad agrícola.

Cuando se organizó la implementación del Proyecto de riego agrícola para aprovechar las aguas residuales de la Planta de Copare (ahora Cono Sur), se convocó a todas las personas que vivían en el valle de Tacna, para ello se seleccionó y se conformó el "Comité de Regantes de Copare", que tomó posesión de las áreas disponibles y empezó a desarrollar actividades agrícolas con las aguas residuales tratadas. La experiencia de Copare fue una de las primeras en el Perú y permitió la evaluación de una serie de aspectos relacionados con el reuso de las aguas residuales en el riego agrícola.

Otro grupo importante de personas que habían quedado fuera de la selección, pero con el fuerte deseo de desarrollar una oportunidad similar a la que se había dado para el primer grupo de los pioneros Copare, en 1978 procedió a

poseionarse en alrededor de 500 ha en la zona denominada "Arunta" al sur de la ciudad, conformando el "Comité de Regantes de Arunta". Dicha ubicación no les permitió recibir las aguas residuales de la PTAR Copare (Cono Sur), por tanto, para desarrollar las actividades agrícolas se organizaron para excavar un pozo tubular artesanal de aguas subterráneas. En 1993 aparece una cantidad pequeña de agua residual en la zona Viñani al sur de Tacna. Los socios comenzaron a hacer gestión para obtener estas excedentes de aguas residuales de Tacna y decidieron a derivar parte de los desagües hacia dicha zona.

En la medida que el uso de las aguas residuales crudas significaba un alto riesgo sanitario, que incluso generaba la protesta de otros agricultores y autoridades de la ciudad de Tacna, en 1997 los agricultores de Arunta procedieron a implementar en forma particular una precaria PTAR de lagunas de estabilización, ubicada a 400 m del inicio de su sistema de riego.

Cuando se construyó la PTAR Magollo en 1997, los agricultores del Comité Copare llegaron a un acuerdo con la Municipalidad Provincial de Tacna para trasladarse a la zona de la Yarada Alta a 8 km de la PTAR Magollo (llamada COPARE-La Yarada), ya que la ciudad se había expandido hasta la zona agrícola inicial en donde habían habilitado los primeros 250 ha para cultivos (Copare Aeropuerto). En este tiempo se sumaron unos grupos de agricultores y crearon las asociaciones Leguia con 330 hectáreas y Para Grande con 100 hectáreas, áreas vecinales a los terrenos de Copare La Yarada. Estas asociaciones de agricultores gestionaron los denuncios y construyeron un canal de 9 km desde la PTAR Magollo hasta la nueva zona agrícola La Yarada Alta.

Con la implementación del Proyecto PTAR Magollo tecnificado, dejaría de operar la PTAR cono sur que entrega agua residual para el Comité de Regantes de Copare, que ya están haciendo su traslado a terrenos aguas debajo de la PTAR en nueva zona agrícola La Yarada Alta, en donde se recibirían también las aguas residuales de la PTAR Tecnificada de Magollo. De la misma forma el Comité de Regantes Arunta hará su traslado a esa nueva zona agrícola en terrenos donados por el Estado y recibirá también aguas residuales tratadas de la PTAR Magollo, y en los terrenos que actualmente utilizan solo podrá hacer uso de agua de pozo para sus regadíos mientras logran vender los terrenos que usan actualmente y se consolida su traslado.

Los demás comités que se ubicaron aguas abajo de la PTAR Magollo cuando se construya mantendrán los suministros que han convenido con la Empresa de Saneamiento (EPS) a cargo del tratamiento de las aguas residuales, así como aquellos que aun teniendo convenios con la EPS están pendientes de recibir efectivamente los efluentes tratados para el desarrollo de sus actividades agrícolas.

La historia del saneamiento en Tacna siempre se ha basado en el reúso de las aguas tratadas en la agricultura, empezado con el proyecto Copare con la primera PTAR Cono Sur hace 40 años. La colaboración crecida históricamente entre la EPS y los Agricultores es la razón principal de la fortaleza de esta solución integral en el ámbito del saneamiento, que Tacna tiene para ofrecer como carácter farol - al nivel nacional y al nivel Latino América.

En Tacna se logró para el bien del medio ambiente, no solo cerrar el ciclo del agua para toda una ciudad de más de 300.000 habitantes, sino también cerrar el ciclo de los nutrientes y reintegrarlas en las cadenas productivas en su totalidad - aunque la gran mayoría de los sistemas del saneamiento al nivel mundial sigue siendo sistemas abiertos. La “eliminación de nutrientes” es un término técnico, mientras la palabra “reúso” parece que fuera una tecnología de segunda clase. La experiencia de Tacna es un ejemplo de cómo los campesinos aprendieron a aprovechar la fuente que tenían a su alcance de manera natural.

Desde el inicio los agricultores y la EPS (respaldado por la Gobernación Municipal) han aprendido a cooperar con una manera de colaboración estructurada, cuyos principios están consagrados en acuerdos escritos.

Por tanto, para mantener la sostenibilidad del proyecto, es importante continuar esta tradición para poder asegurar de manera ordenada el reúso de la totalidad de agua residual producida por la PTAR Magollo hasta el horizonte del proyecto en el año 2043 y más allá.

La EPS Tacna mantiene convenios con las asociaciones de agricultores que actualmente utilizan los efluentes de la PTAR Magollo. Igual mantiene convenios con las tres asociaciones que quieren utilizar el efluente cuando la EPS está en condiciones de tener más agua para distribuir.

Los convenios regulan la relación entre EPS y usuario y establecen “las condiciones mínimas y obligaciones de las partes para la captación o interconexión al sistema de tratamiento del agua residual”.

En 2018 se han elaborado actas de compromiso entre las ocho asociaciones (que recibirán los efluentes de aguas residuales tratados) y la EPS en el marco de la elaboración del Estudio de Pre-inversión del Proyecto Programa PTAR 1. Estas actas confirman el acuerdo general en el proyecto y constituyen la base para el futuro contrato, que también incluye pagos concretos basados en una tarifa negociada de aguas residuales, compromiso de adecuar los sistemas de captación y conducción de agua residual, etc. De la misma manera estas actas estipulan la calidad de agua residual tratada a ser entregada (post proyecto) y la cantidad máxima que le concedería a cada uno de los ochos usuarios.

En el artículo 5 de las actas de compromiso se reitera el aspecto de calidad y se relativiza: "La EPS Tacna entregará el agua residual tratada en las condiciones de calidad determinadas por el nivel de depuración alcanzado mediante la infraestructura de tratamiento que se implementará con el Proyecto." La Tabla 25 muestra las características de calidad de agua que debe cumplir la PTAR para el reúso por las Asociaciones de Regantes.

Tabla 25. Características del efluente de la nueva PTAR Tacna en Magollo como queda estipulado en las actas de compromiso de 2018

| Parámetro | Unidad | Cantidad |
|---|------------|-------------|
| Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) | mg/l | < 60 |
| Sólidos suspendidos totales (SST) | mg/l | < 50 |
| Nitrógeno como nitratos (N-NH3) | mg/l | < 30 |
| Coliformes termo tolerantes | NMP/100 ml | |
| Nemátodos intestinales | Huevos/l | ≤ 1000 - ≤1 |
| Caudal promedio de aguas residuales tratadas año 2023 | l/s | ≤ 722 |
| Caudal promedio de aguas residuales tratadas año 2042 | l/s | ≤ 908 |

Fuente: Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I).
Diciembre de 2019

La Tabla 26 muestra el Plan de distribución inicial del efluente de acuerdo con el Convenio suscrito entre la EPS y las Asociaciones de Regantes.

Tabla 26. Plan de distribución inicial del efluente de la nueva PTAR Tacna

| Asociaciones de Regantes | Área [ha] | Caudal convenio con la EPS [l/s] | Volumen anual [m³] |
|--------------------------|-----------|----------------------------------|--------------------|
| Copare - La Yarada | 1.400 | 300 | 9.460.800 |
| Leguía | 330 | 30 | 946.080 |
| Para Grande | 100 | 5 | 157.680 |
| Los Pinos | 300 | 40 | 1.261.440 |
| Arunta Nueva - La Yarada | 400 | 150 | 4.730.400 |
| San Andrés | 30 | 5 | 157.680 |
| Flores Crisosto | 48 | 6 | 189.216 |
| Bosque Chico | 40 | 10 | 315.360 |
| Total Agricultura | 2.648 | 546 l/s | 17.218.656 m³ |

Fuente: Estudios adicionales relacionados al reúso de las aguas residuales y a temas sociales y ambientales. preparación del programa PTAR (Proyecto Tacna) (PTAR I).
Diciembre de 2019

Los logros en el contexto local del Proyecto Programa PTAR I bajo los aspectos de la mitigación del cambio climático y la protección del medioambiente son:

- Reducción de la presión sobre los recursos hídricos por el reúso agrícola de las aguas residuales de la ciudad de Tacna en su totalidad.
- Recuperación y reintegración de los nutrientes al ciclo productivo, contenidos de la excreción diaria de heces de 300.000 seres humanos, población (y visitantes) de la ciudad de Tacna
- Creación de empleo e ingresos financieros a través del uso productivo de las aguas residuales tratadas y de su valor en nutrientes para la agricultura.

Al ver la magnitud de las áreas de regadío, se puede dar cuenta que todas las partes involucradas tienen beneficios en este concepto de saneamiento integral. Los agricultores obtienen con el agua y los nutrientes la base (orgánica y mineral) para la agricultura en los suelos arenosos del desierto costero peruano.

La EPS tiene un cliente para venderle sus aguas residuales y no tiene que pagar una tarifa de vertimiento. El ecosistema aprovecha porque se cuida el equilibrio hídrico local y facilita la reincorporación de los micronutrientes y macronutrientes a los ciclos productivos de la biomasa en la agricultura.

En todo caso, existe gran incertidumbre en el tema del reúso de aguas residuales tratadas, entre casi todos los involucrados en el tema, dado que el marco normativo peruano todavía no ha logrado entender la práctica de reúso de aguas residuales tratadas en la agricultura en toda su complejidad. Si bien existe una legislación que promueve con énfasis el reúso de las aguas residuales en el Perú, no existe un reglamento sobre cómo se debe manejar la gestión de aguas residuales en la práctica del reúso agrícola.

La razón principal es que no se aprovecha un ejemplo práctico en el Perú para desarrollar un proceso de aprendizaje normativo. En la gran mayoría de los casos existentes, la práctica del reúso se hace de manera informal, o se trata de modelos donde un privado adquiere aguas residuales crudas para fines de tratamiento y reúso, tal como por ejemplo en unos proyectos de riego de parques y jardines en Lima o en la actividad minera de Arequipa.

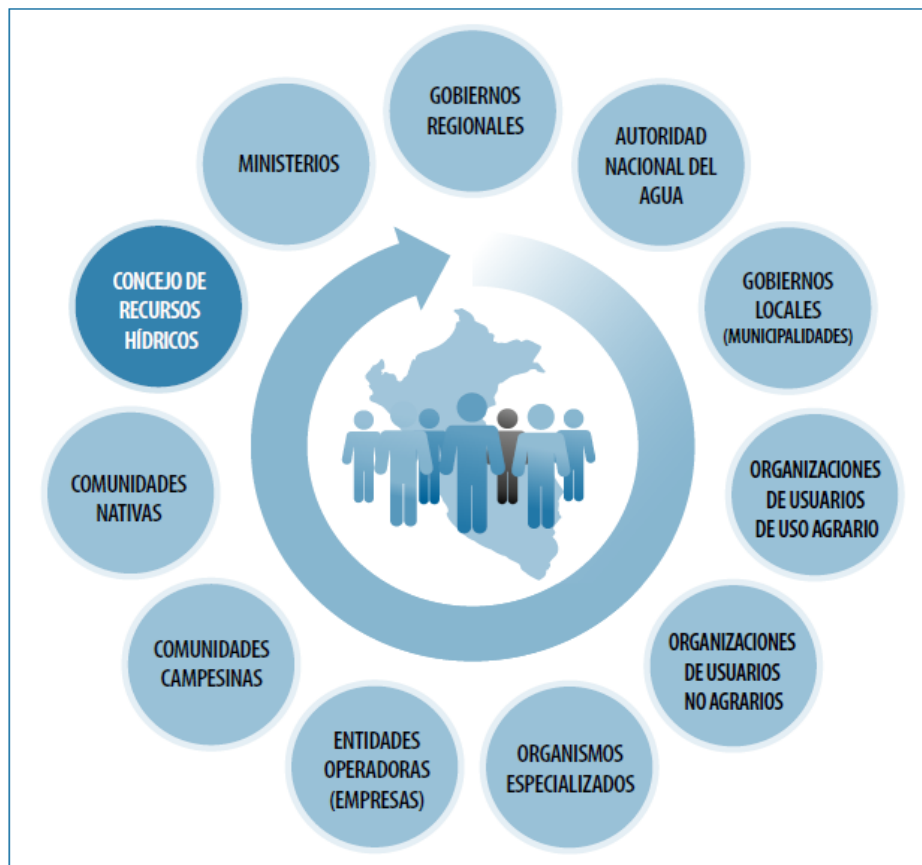
El asunto es que nunca se ha negociado y formalizado una venta por tarifas de aguas residuales tratadas por una entidad de servicios públicos a una comunidad de usuarios agrícolas. Tacna sería el precedente, ya que es la única ciudad con 100% reúso de las aguas residuales tratadas en la agricultura en el Perú y probablemente en todo el continente latinoamericano.

Por eso el proyecto Tacna, con su larga historia en el reúso y el alto grado de formalización que ya se ha logrado establecer, es una muy buena ocasión para desarrollar estándares y procedimientos en base de las experiencias y conocimiento que ya se han acumulado, y que se sigue profundizando en el trascurso de la implementación del Programa PTAR.

Aspectos Institucionales

En la Gestión del recurso hídrico en el Perú participan diferentes actores, los cuales, de acuerdo con lo dispuesto en la Ley de Recursos Hídricos (LRH) deben organizarse en un espacio de coordinación denominado Concejo de Recursos Hídricos de cuenca, como se observa en el Gráfico 33.

Gráfico 33. Concejo de Recursos Hídricos



Fuente: Agencia Nacional de Agua (ANA)

La organización institucional de Perú es similar a la colombiana. Existen competencias a partir del gobierno nacional, provincial y municipal. A

continuación, se describe de una forma detallada el rol de los actores institucionales vinculados con el manejo de aguas residuales³⁹:

Las competencias generales de las entidades que conforman los recursos hídricos se presentan a continuación⁴⁰:

La Autoridad Nacional del Agua (ANA): Ente rector y máxima autoridad técnico normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos.

El Ministerio del Ambiente (MINAM): Autoridad ambiental, vela por la concordancia entre la gestión del ambiente y las disposiciones o gestiones de los recursos hídricos.

El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI): Publica las normas de mayor rango que requiera aprobar la ANA a fin de facilitar una buena gestión de los recursos hídricos.

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS): Bajo el rol de universalización del acceso a los servicios de agua potable y saneamiento.

Otros Ministerios: Ejercen su rol normativo, observando concordancia entre las regulaciones que emita la ANA con las funciones o disposiciones que hayan publicado o tengan por publicar dichos ministerios.

Los gobiernos regionales y locales: Armonizan sus políticas y objetivos con la gestión de los recursos hídricos, evitando conflictos de competencia y efectivizando el logro de un buen uso del recurso hídrico.

Las organizaciones de usuarios de agua agrarios y no agrarios: Asociaciones que participan en la gestión del uso sostenible del agua.

Las entidades operadoras de los sectores hidráulicos de carácter sectorial y multisectorial: Entidades que manejan la infraestructura hidráulica (embalses de agua, represas, canales de abastecimiento de agua, etc.).

Las comunidades campesinas y nativas: Participan en la elaboración del Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la Cuenca a la que pertenecen.

Las entidades públicas vinculadas con la gestión de los recursos hídricos: Articulan sus acciones con la ANA. Estas entidades son la Superintendencia

³⁹ Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), (abril 2014). Lima-Perú.

⁴⁰ Calidad del agua en el Perú. Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales. Lima: DAR, 2017. 136 pp.

Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS), el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrografía (SENAMHI), el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), la Dirección General de Capitanías y Guardacostas (DICAPI), proyectos especiales relacionados con los recursos hídricos, autoridades ambientales sectoriales y entidades prestadoras de servicios de saneamiento.

Los consejos de recursos hídricos de cuenca de la ANA: Participan en la planificación, coordinación y concertación para el aprovechamiento sostenible de los recursos hídricos a través del Plan de Gestión de Recursos Hídricos de sus cuencas.

La composición institucional de Perú es similar a la colombiana. Existen competencias a partir del gobierno nacional, provincial y municipal. A continuación se describe de una forma detallada el rol de los actores institucionales vinculados con el manejo de aguas residuales⁴¹:

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento: Es el ente rector del Estado en los asuntos relacionados al sector saneamiento. Tiene las siguientes funciones:

- Formular, normar, dirigir, coordinar, ejecutar y supervisar la política nacional en dicho sector, así como evaluar permanentemente sus resultados, adoptando las correcciones y medidas correspondientes.
- Generar las condiciones para el acceso a los servicios de saneamiento en niveles adecuados de calidad y sostenibilidad.
- Asignar los recursos económicos a los gobiernos locales y las EPS de Saneamiento para la construcción de obras de saneamiento y otorgar la certificación ambiental a dichos proyectos.
- Fiscalizar el cumplimiento de los compromisos ambientales contenidos en los instrumentos de gestión ambiental de los proyectos de saneamiento a nivel nacional y de los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Autoridad Nacional del Agua (ANA): Se encarga de las siguientes actividades:

- Autoriza los vertimientos de aguas residuales tratadas con las opiniones previas técnicas favorables de la Dirección General de Salud Ambiental del

⁴¹ Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), (abril 2014). Lima-Perú.

Ministerio de Salud y de la autoridad ambiental sectorial, las cuales son vinculantes.

- Verifica el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA) en los cuerpos de agua e impone sanciones. Puede suspender las autorizaciones otorgadas si verifica que el agua residual tratada puede afectar la calidad del cuerpo receptor o sus bienes asociados.
- Autoriza el reúso de agua residual, bajo previa acreditación de que no se pondrá en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la fauna y flora, o se afecte otros usos.

Gobierno Local – Municipalidades Provinciales: Tienen la función de regular y controlar el proceso de disposición final de desechos sólidos, líquidos y vertimientos industriales en el ámbito provincial. Por ello, administran o contratan los servicios de una EPS Saneamiento o la que haga sus veces. Asimismo, son responsables por el acceso y la prestación de los servicios de saneamiento en el ámbito de su provincia.

Gobierno local – Municipalidades Distritales: De manera conjunta con su municipalidad provincial, tienen la función de administrar y reglamentar directamente o por concesión, el servicio de agua potable, alcantarillado y desagüe, cuando por economías de escala resulte eficiente centralizar provincialmente el servicio.

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA): El OEFA ejerce funciones de evaluación, supervisión y fiscalización en lo referido al tratamiento de las aguas residuales provenientes de las actividades económicas de sectores como la mediana y gran minería, hidrocarburos en general, electricidad, procesamiento industrial pesquero, acuicultura de mayor escala, así como producción de cerveza, papel, cemento y curtiembre de la industria manufacturera.

Los titulares de las actividades económicas descritas deben cumplir con no exceder los límites máximos permisibles (LMP) para los efluentes que generan antes de que sean descargados a la red de alcantarillado o a los cuerpos receptores. El OEFA es la autoridad facultada para supervisar directamente en estos casos, así como también de aplicar sanciones en caso se excedan los LMP.

Asimismo, como ente rector del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, supervisa la labor fiscalizadora de las Entidades de Fiscalización Ambiental (EFA), entre las cuales se encuentran las municipalidades distritales y provinciales, los gobiernos regionales, la Autoridad Nacional del Agua (ANA), o los ministerios (Producción, Agricultura y Riego, etc.) que tienen la responsabilidad de supervisar el adecuado manejo de las aguas residuales

respecto de las actividades económicas que se encuentran dentro del ámbito de su competencia.

Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS): Es la entidad que vela por la calidad del servicio que deben brindar las EPS de Saneamiento. Norma, regula, supervisa y fiscaliza, dentro del ámbito de su competencia, la prestación de servicios de saneamiento a nivel nacional y de acuerdo a su rol regulador, también es responsable de sancionar y solucionar controversias y reclamos.

Entidades Prestadoras de Servicios de Saneamiento: Tienen como finalidad operar y mantener en condiciones adecuadas los componentes de los sistemas de abastecimiento de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario, y deben prestar dichos servicios con oportunidad y eficiencia. Para ello, las EPS de Saneamiento están obligadas a:

- Producir, distribuir y comercializar agua potable, así como recolectar, tratar y disponer adecuadamente las aguas servidas.
- Recolectar las aguas pluviales y disponer sanitariamente las excretas.
- Ejecutar programas de mantenimiento preventivo anual a fin de reducir riesgos de contaminación de agua para consumo, de interrupciones o restricciones de los servicios.
- Realizar un control de los Valores Máximos Admisibles (VMA) a través de laboratorios acreditados ante el Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual (INDECOPI), estando facultado para imponer sanciones en caso el generador incumpla con las obligaciones dispuestas en la normativa vigente, sin perjuicio de la aplicación de sanciones establecidas en otras leyes y reglamentos.

Ministerio de Salud (MINSA): El Ministerio de Salud, a través de Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), tiene la función de establecer las normas técnicas sanitarias para el abastecimiento de agua para consumo humano; y el manejo, reúso y vertimiento de aguas residuales domésticas y disposición de excretas. Asimismo, vigila la calidad sanitaria de los sistemas de agua y saneamiento para la protección de la salud de la población. También, diseña e implementa el sistema de registro y control de vertimientos con relación a su impacto en el cuerpo receptor.

En relación con la Institucionalidad de la gestión del reúso de aguas residuales de las actividades poblacionales y productivas, se encuentra sectorizada a través de diferentes Ministerios, como lo son el de Energía y Minas, Producción, Salud, Vivienda Construcción y Saneamiento y Agricultura a través de sus Direcciones Generales de Medio Ambiente.

Cabe reiterar que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es el ente rector del Estado en los asuntos relacionados con el sector del saneamiento.

Adicionalmente, en caso de que las aguas residuales generadas requieran ser dispuestas a un cuerpo natural de agua o reusar, ya sea con fines agrícolas u otros fines, se requiere autorización, la cual se otorga bajo el cumplimiento de lo establecido en la Ley No 29338 – Ley de Recursos Hídricos y la Autoridad competente es la ANA. Así mismo, es preciso indicar que cuando el reúso es para fines agrícolas se requiere opinión de la Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio de Salud.

La verificación del cumplimiento de los instrumentos ambientales otorgados que involucra el control de la calidad del agua residual a reusar, corresponde a cada Dirección General de Medio Ambiente, quien es responsable de la fiscalización.

La siguiente tabla resume el marco institucional de Perú vinculado a la gestión de las descargas y reúso de las aguas residuales según criterios de alcance e intervención⁴²:

Tabla 27. Marco Institucional de Perú

| Institución/Organismo | Dependencia | Alcance | Función* | Responsabilidad | Actor |
|-------------------------------|--|---------------|-----------|-----------------------------|--------|
| Ministerio del Ambiente | OEFA | Transectorial | 1,2,3,4 | Autoridad Ambiental | Estado |
| Ministerio de Agricultura | ANA (Autoridad Nacional del Agua) | Transectorial | 1,2,3,4,5 | Autoridad Nacional del Agua | |
| | DGAAA | Sectorial | | Autoridad Sectorial | |
| Ministerio de Salud | DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental) | Transectorial | 1,2,3,4,5 | Autoridad de Salud | |
| Ministerio de Energía y Minas | DGM (Dirección General de Minería) | Sectorial | 1,3 | Autoridad Sectorial | |
| | DGAAM (Dirección General de Asuntos Ambientales Agricultura) | | 1,3 | | |
| | DGH (Dirección general de Hidrocarburos) | | 1,3 | | |
| Ministerio de la Producción | DGAAL | Sectorial | 1,2,3 | Autoridad Sectorial | |
| | DGAAP | | 1,2,3 | | |
| Congreso de la República | | Transectorial | 1,4,5 | Poder legislativo | |
| Gobierno Local | | --- | 1,2,3 | | |

⁴² Fernández, A. Aguas Residuales en el Perú, Problemática y Uso en la Agricultura. Autoridad Nacional de Agua, Ministerio de Agricultura.

| Institución/Organismo | Dependencia | Alcance | Función* | Responsabilidad | Actor |
|---|-------------|---------------|----------|-------------------------|-------------------|
| Gobierno Regional | | | 1,2,3 | Participación Ciudadana | Sociedad Civil |
| Sociedad Civil | | | --- | | |
| ONGs | | | --- | | |
| Defensoría del Pueblo | | Transectorial | | Fiscalizador | --- |
| Inversiones Minera | | | --- | --- | Inversión Privada |
| Inversiones Industriales | | | --- | | |
| Cooperación Técnica y/o Fin Internacional | | | --- | Cooperante Donador | --- |

*1: Normativa; 2: Vigilancia; 3: Control; 4: Fiscalización; 5: Sancionador

Aspectos legales

Perú es un país que sufre de un estrés hídrico considerable y en aumento, agravado por el crecimiento poblacional y la ocurrencia cada vez más frecuente de crisis hídricas y desastres climáticos/ambientales que han impactado en gran medida el acceso a agua potable y la continuidad del suministro. Paradójicamente, el 65% de la población peruana que produce cerca del 80% del PIB nacional se concentra sobre una cuenca hidrográfica que representa solo el 1,8% de la oferta hídrica del país, estando las otras fuentes a distancias considerables de los principales centros poblados.

Además de las dificultades geográficas permanentes y constantes, Perú al igual que otros países de la región sufre el impacto del fenómeno de El Niño, por lo que la ocurrencia de fenómenos climáticos cíclicos pero que en la mayoría de los casos no son tan predecibles ni su ocurrencia ni su impacto, afectan la disponibilidad del recurso hídrico especialmente en la cuenca pacífica donde se concentra la población.

La Ley 29338 de 2009 sobre recursos hídricos y su reglamentación expedida en el año 2010 tratan en uno de los capítulos el tema del reúso. Para su elaboración y el desarrollo de la normativa del sector, Perú ha hecho uso de las guías de uso seguro de aguas residuales que la Organización Mundial de la Salud (OMS) prepara desde 1973 como un insumo importante que se puede adaptar a las condiciones locales.

Como se mencionó, el país cuenta con la ANA y el Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca, quienes son las entidades encargadas de autorizar el reúso de agua residual tratada de acuerdo con el fin para el que esta se destine y en coordinación con la autoridad sectorial que sea competente. Esta autorización se tramita mediante un procedimiento administrativo y tiene varios requisitos, así:

- Que el agua residual sea sometida a tratamientos previos y que cumplan con los parámetros de calidad establecidos para los usos sectoriales.

- Contar con certificación ambiental otorgada por la autoridad ambiental sectorial competente que considere específicamente la evaluación ambiental de reúso de aguas.
- No habrá autorización si ponen en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la flora y fauna o afecte a otros usos.

La Ley 30045 – Ley de Modernización de los Servicios de Saneamiento, permite que los prestadores de servicios puedan comercializar residuos sólidos y el servicio de tratamiento de aguas residuales con fines de reúso. La reglamentación de tal norma establece que se puede comercializar el agua residual tratada cumpliendo la normativa sanitaria y mediante la suscripción de contratos como resultado de invitaciones a ofertar, venta directa o convenios de prestaciones recíprocas.

Se ha implementado en el país el denominado “Certificado Azul”, el cual hace parte de una estrategia de la ANA para la reducción voluntaria de la “huella hídrica” generada por las empresas. Para participar del programa las empresas deben: medir su huella hídrica, realizar un proyecto de reducción de huella hídrica y desarrollar un proyecto de valor compartido del agua. De acuerdo con la Resolución Jefatural N°104-2018-ANA, para obtener el certificado deben ejecutar con éxito los compromisos asumidos voluntariamente para la reducción.

El “Certificado Azul” no es solo un reconocimiento reputacional, pues en coordinación con otras entidades públicas se han emitido normas⁴³ que le dan una aplicación práctica al otorgar puntaje adicional en procesos de contratación con el Estado peruano y como un requisito para acceder y participar en ferias internacionales de exportaciones, misiones comerciales y ruedas de negocio realizadas por la Dirección de Promoción de Exportaciones de la Comisión de Promoción del Perú -PROMPERÚ.

La experiencia de Perú muestra que existe considerable interés en reusar agua tratada y que el país avanza en esta dirección. Se han formulado algunas críticas por ejemplo sobre la permisividad de los estándares de los vertimientos de agua y del agua tratada respecto de los estándares de la OMS, pero los procesos de autorización establecidos por las normas y el requisito general de que no ponga en peligro la salud humana, flora, fauna u otros usos representan una protección legal frente a los niveles de tratamiento.

⁴³ La Directiva N°001-2019-OSCE/CD corresponde a las Bases estándar de adjudicación simplificada para la contratación de servicios en general expedidas por el Organismo Supervisor de Contrataciones para el Estado - OSCE las cuales incluyen el beneficio por la presentación del Certificado Azul. Por otro lado, la Resolución de Gerencia General N°048-2018-PROMPERÚ/GG corresponde a los beneficios reconocidos por la Comisión de Promoción del Perú – PROMPERÚ a los que cuentan con el certificado.

En síntesis, se destacan los siguientes factores del caso peruano:

- **Normas claras respecto del reúso de agua:** Existen normas claras que rigen el reúso de agua, desde el aspecto tarifario hasta las condiciones para solicitar y obtener las autorizaciones correspondientes ante la ANA y demás autoridades del sector.
- **Iniciativas para la reducción voluntaria de la huella hídrica:** Se establecen iniciativas para hacer más atractivo el reúso de agua mediante beneficios concretos incluidos en la regulación. Además, es una muestra de que existe coordinación interinstitucional para acordar incentivos transversales que resulten atractivos para las empresas.

Tabla 28. Matriz normativa de las principales leyes de Perú

| Norma | Objeto |
|---|---|
| Ley 29338 de 2009 | Es la ley que regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Contiene un artículo sobre el reúso de agua tratada donde se establece la autoridad que otorga la autorización para el reúso |
| Decreto Supremo No. 001-2010-AG: Reglamentación de la Ley 29338 de 2009 | Se encarga de regular el uso y gestión de los recursos hídricos que comprenden el agua continental: superficial y subterránea, y los bienes asociados a ésta; asimismo, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión. Este decreto desarrolla en más detalle cuáles son las condiciones para la autorización y el procedimiento a seguir. |
| Decreto Supremo No. 003-2010-MINAM | Establece los límites máximos permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales |
| Ley 30045 de 2013 | Establece el marco para el proceso de modernización de los servicios de saneamiento, cuyo objeto es establecer medidas orientadas al incremento de la cobertura y al aseguramiento de la calidad y la sostenibilidad de los servicios de saneamiento a nivel nacional, promoviendo el desarrollo, la protección ambiental y la inclusión social |
| Decreto Supremo No. 013-2016-VIVIENDA: Reglamentación de la Ley 30045 de 2013 | Se encarga de desarrollar los principios, objetivos, mecanismos y procedimientos para la modernización de los servicios de saneamiento en el ámbito urbano y rural, así como las funciones, atribuciones, obligaciones y responsabilidades de las entidades vinculadas con la prestación de los servicios de saneamiento que intervienen en el proceso de modernización |

| Norma | Objeto |
|-------------------------------------|---|
| Resolución Jefatural N°104-2018-ANA | Promover la medición y reducción de la huella hídrica, así como la implementación de acciones de valor compartido en las cuencas. Crea el Certificado Azul, sus condiciones de uso y el programa de reducción voluntaria de la huella hídrica |

Conclusiones

- Las experiencias documentadas de reúso de aguas residuales en Perú se dieron debido a la escasez del recurso hídrico que enfrentan diferentes zonas desérticas del país, lo cual incentivó la necesidad de aprovechamiento estas aguas.
- Las principales experiencias se han dado en las zonas agrícolas, donde los agricultores usan de manera informal las aguas residuales no tratadas para actividades de riego, dado que es la única alternativa de fuente de abastecimiento. Así mismo, porque consideran que el uso de las aguas residuales les trae beneficios económicos al evitarles costos de fertilizantes para los cultivos que representan cerca del 40% del costo de producción. Esto se da debido a que en general son cultivos para consumo local, quienes exportan no consideran el agua residual como alternativa.
- La Autoridad Nacional del Agua (ANA) es la entidad principal responsable de la gestión del reúso de las aguas residuales tratadas, quien se encarga de autorizar el reúso de agua residual, bajo la acreditación de que no se pondrá en peligro la salud humana y el normal desarrollo de la fauna y flora, o se afecte otros usos. Sin embargo, es una entidad muy nueva, que aún está en proceso de ajuste y fortalecimiento.
- La Autoridad Nacional del Agua reguló el reúso mediante el artículo 82 de la Ley 29338 de 2009, donde se autoriza el uso de agua residual tratada según el fin para el que se destine.
- Las autoridades responsables de la gestión de reúso de agua residual tratada en Perú son el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), el Ministerio del Ambiente (MINAM), Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (SUNASS)
- Hasta el año 2017, en Perú se reutilizaron 126.79 hm³ de aguas residuales, que corresponde al 4% del total de las aguas tratadas en el país. Estas aguas se

destinaron principalmente a actividades de riego, recirculación de procesos, mitigación ambiental y limpieza y mantenimiento de áreas. El sector de la agricultura (riego) es el sector más beneficiado en el uso de aguas residuales tratadas en el país, con un volumen de reúso de 80.657hm³, que corresponde al 63,41% del total de aguas residuales.

- Dentro de las experiencias documentadas se puede evidenciar que la tecnología implementada para el tratamiento de las aguas residuales con fines de riego es lodos activados, que consiste en un proceso biológico donde se realiza la depuración del agua contaminada mediante un tratamiento aerobio.
- En Perú no existe una normativa general para establecer los límites de la calidad de aguas residuales tratadas, por lo que en el país se rige por las guías de la OMS, las cuales definen la calidad del agua residual a reutilizar en función de la evaluación del riesgo para la salud de los que participan en la cadena del reúso. La Autoridad ambiental define la calidad del agua dependiendo del tipo de uso que se le va a dar al agua tratada.
- Con el fin de incentivar el uso de aguas residuales tratadas en varias ciudades de Perú, las autoridades municipales han realizado aumentos en las tarifas de uso de agua potable para actividades como riego de áreas verdes, que obliga a los municipios a buscar alternativas de riego para estas áreas y disminuir el uso de agua potable.
- Dentro de los principales avances del reúso de agua en Perú, se destaca que hoy en día las empresas de Agua tienen la posibilidad de cobrar por el uso de agua residual tratada a los usuarios.
- Recientemente, en Perú se conformó una mesa interinstitucional con asociaciones público - privadas para fortalecer la implementación del proceso de reutilización de aguas residuales en el país. Esta mesa cuenta con la participación del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS), Ministerio del Ambiente (MINAM), Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), Ministerio de Salud (MINSA), y todos los demás actores involucrados en el tratamiento de aguas residuales.
- En la mesa interinstitucional se está preparando un protocolo que da los criterios necesarios a los municipios para establecer la tarifa de cobro del agua residual tratada o no tratada con el fin de facilitar los acuerdos entre los usuarios y la empresa. Así mismo, se está trabajando en un cambio de enfoque y es que el nivel de tratamiento del agua debe hacerse teniendo en

cuenta el uso que va a tener y las exigencias pueden ser diferentes además dependiendo de la región donde se van a construir.

- La mesa igualmente está analizando los usos que se le puede dar al agua residual, a partir de experiencias en diversificación de cultivos para no regar productos que sean comestibles directamente el campo, como las hortalizas, sino productos industriales, cosméticos, árboles de olivo para la producción de aceite, etc.
- No se está considerando el uso del agua residual tratada para el abastecimiento de agua potable, sin embargo, en muchos países las fuentes donde se realizan descargas de agua residual sin tratar son usadas como fuentes abastecedoras donde se cata agua para consumo humano.
- Uno de los riesgos en los que la mesa está trabajando es en lograr la participación de todas las entidades de gobierno, especialmente el Ministerio de salud, para que la reglamentación que se expida esté acorde con los usos que se le vayan a dar al agua y no se generen límites excesivos que afecten los costos del tratamiento del agua a reusar.
- Existen normas claras que rigen el reuso de agua, desde el aspecto tarifario hasta las condiciones para solicitar y obtener las autorizaciones correspondientes ante la ANA y demás autoridades del sector.
- Iniciativas para la reducción voluntaria de la huella hídrica: Se establecen iniciativas para hacer más atractivo el reuso de agua mediante beneficios concretos incluidos en la regulación. Además, es una muestra de que existe coordinación interinstitucional para acordar incentivos transversales que resulten atractivos para las empresas

3.2.2. Experiencias países fuera de Latinoamérica

3.2.2.1. Sudáfrica

Generalidades

Sudáfrica está ubicado en la parte sur de África y cuenta con una población aproximada de 57,2 millones de habitantes y una extensión de 1.221.038 Km². Políticamente es un Estado descentralizado, formado por un Gobierno central y 9 Provincias.

Gráfico 34. Mapa de Sudáfrica



Fuente: Oficina de información diplomática, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, Ficha de país Sudáfrica, 2019

Sudáfrica se encuentra entre los 50 países con menos precipitaciones del mundo, con una media anual de 495 mm, muy por debajo de los 860 mm de media mundial⁴⁴, y es considerado uno de los países más secos del África subsahariana, junto con Namibia y Botswana. Las precipitaciones se caracterizan por su

⁴⁴ Department Green Cape, of Market Water Intelligence Affairs, Annual Report Performance 2017: Water

temporalidad y variabilidad geográfica y por las altas tasas de evaporación⁴⁵.

En las regiones más áridas del oeste del país, las precipitaciones alcanzan en la estación húmeda los 100 mm, mientras que el este y el sudeste reciben precipitaciones de hasta 1.000 mm de media durante todo el año. Se estima que el 21% de Sudáfrica recibe menos de 200 mm de precipitaciones al año. (Oficina de Información Diplomática, Ficha de País - Sudáfrica, 2019).

Disponibilidad y uso de agua

Sudáfrica drena en cuatro sistemas principales (FAO, 2016):

- El río Orange, que nace en las Tierras Altas de Lesotho y drena aproximadamente el 48 % (606 000 km²) al Océano Atlántico junto con sus afluentes, en particular los ríos Caledon y Vaal.
- La cuenca del río Limpopo, que drena la meseta al norte de la cresta de Witwatersrand, es decir, aproximadamente el 14 %, hasta el Océano Índico con sus principales afluentes, como el río Crocodile y el río Olifants.
- Todos los demás ríos que desembocan en el Océano Índico, el más grande es el río Tugela. Cubren en total aproximadamente el 29 %.
- Ríos que drenan las montañas Fold del sudoeste del Cabo hacia los océanos Atlántico e Índico. Cubren en total aproximadamente el 9 por ciento del país, los ríos más importantes en esta área son los ríos Olifants y Breede.

Los recursos hídricos en Sudáfrica permiten un suministro total de agua de 15.000 millones de m³/año, de los cuales el 68% proviene de agua de superficie, 13% de agua subterránea, 13% de flujos de retorno y un 6% de otros recursos, como desalinización. (FAO, 2016).

Producción de aguas residuales y su tratamiento

Sudáfrica tiene 824 sistemas de tratamiento de aguas residuales en 152 municipios que tienen la capacidad de diseño colectivo para recibir 6.5 mil millones de litros de aguas residuales por día. (Toxopeüs, 2019).

En 2013, estos sistemas recibieron 5.12 mil millones de litros en todo el país, dejando en teoría un 22.2 % de capacidad excedente para la demanda futura. (Toxopeüs, 2019).

Sudáfrica es un país con niveles de escasez de agua muy altos, por lo cual se han desarrollado diferentes técnicas de reutilización de agua en el país con el fin

⁴⁵ Idem

de disminuir las afectaciones provocadas por la falta de recursos hídricos.

El país ha sido pionero en el reciclaje y tratamiento interno de aguas residuales desde 1980. Esta práctica tiene la ventaja de reducir la demanda como la cantidad de efluentes descargados. (WWAP, 2017).

Descripción del(os) Proyecto(s)

Reúso Domestico

Reúso de agua residual de una mina en agua potable para municipios cercanos en eMalahleni⁴⁶.

Aspectos técnicos

La planta trata actualmente más de 30 millones de litros de drenaje ácido de rocas todos los días (es el drenaje ácido de las minas o la escorrentía de las aguas ácidas de las minas) y transforma 16 millones de litros de este drenaje en agua potable para más de 80 000 consumidores de una municipalidad que presenta un rápido crecimiento y tiene dificultades con el agua y bajos recursos económicos. La planta fue construida en 2007 como un proyecto colaborativo de Anglo American, BHP Billiton (ahora propiedad de South32) y la municipalidad de Emalahleni, abrió nuevos caminos como la primera instalación del mundo en tratar el drenaje ácido de rocas y purificarlo hasta alcanzar las normas del agua potable.

Esto redujo a cero la dependencia de Anglo American de fuentes externas de agua, ya que el agua tratada y reciclada cumple con todas las necesidades de agua de las operaciones mineras de Anglo American en el área.

La planta fue posible gracias a que las dos empresas que competían por una cuota dominante del mercado local del carbón comprendieron que necesitaban abordar una amenaza empresarial compartida y renunciar a toda ventaja competitiva posible que implicaba hacerlo por sí solas.

La inquietud fue creciendo en torno a la disponibilidad del agua a medida que más personas migraban a la ciudad. Para abordar la situación el Gobierno impuso a la industria regulaciones nuevas, y costosas, para el tratamiento del agua.

Las dos empresas, el Gobierno, los líderes comunitarios y otros representantes del sector privado hicieron una inversión conjunta en la planta de tratamiento de

⁴⁶ EPA United States Environmental Protection Agency. (2012). Guidelines for Water reuse 2012. [PDF Files]. Washington D.C: Autor. Recuperado: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-08/documents/2012-guidelines-water-reuse.pdf>

agua, se beneficiaron de las economías de escala para cumplir con los requisitos regulatorios y, a la vez, convirtieron una responsabilidad medioambiental en un activo empresarial y societario, mediante conversaciones exhaustivas y consultas constantes desde el principio.

Para asegurar la alineación entre los distintos grupos de partes interesadas, las discusiones se llevaron a cabo en diversas formas, con reguladores, a través de seminarios para la comunidad, agencias de uso del agua y otras agencias existentes de uso del agua. Para llegar a esta solución, las empresas mineras participaron en el diálogo frecuente y en la discusión que generaba avances y retrocesos.

Debido al compromiso de las partes interesadas, todos los que participaron tenían una buena comprensión del proyecto, lo que resultó en la obtención oportuna del permiso. La prensa contribuyó de manera significativa al elevar el perfil público del proyecto con artículos habituales en las noticias, lo cual mejoró el nivel de interacción y participación del público.

Los socios conformaron un comité de enlace de las operaciones como el organismo central para evaluar el desempeño frente a los objetivos y la producción planificada. Actualmente, las reuniones del comité siguen siendo una plataforma para administrar los contratos de suministro del agua y los acuerdos de nivel de servicio entre las partes interesadas. El comité activo también asegura que se mantenga vigente la política de compromiso abierto con respecto a la planta de tratamiento y que el suministro de agua continúe beneficiando al público en general.

Esta asociación tiene sus desafíos, lo que se debe, en su mayoría, a las irregularidades en los acuerdos financieros con la municipalidad, que paga la transferencia y la cloración del agua.

Aun así, las recompensas superan los riesgos, y los socios originales ampliaron su colaboración para incluir un enfoque más amplio sobre la sostenibilidad del agua a más largo plazo. "Definitivamente, estamos mejor gracias a la colaboración", expresó Ritva Muhlbauer, directora de Recursos Hídricos de la operación de carbón de Anglo American. "La planta de reciclaje de aguas residuales de Emalahleni, la primera iniciativa minera respaldada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ha sentado un precedente como una fuerza para la sostenibilidad en un clima cambiante. Otras empresas y otras municipalidades de regiones con dificultades con el agua están replicando la iniciativa. Esta también ha brindado beneficios adicionales para la municipalidad: la creación de empleo, el menor costo del agua y el mayor

acceso a agua limpia por parte de las comunidades pobres, lo que genera mejoras en la salud pública”.

Para este proyecto se evaluaron alrededor de 13 tecnologías, de todas ellas, se optó por la desalinización avanzada de membrana, sistema de tratamiento que permite disminuir metales pesados y sulfatos presentes en el agua residual proveniente de las minas de carbón. La razón por la cual se decidió implementar esta tecnología y no otras fue principalmente por los bajos costos del ciclo de vida, una alta tasa de recuperación del agua (más del 99% se puede recuperar) y posibilidad de recuperación y reutilización de los residuos generados en el proceso.

Caracterización de las aguas antes y después del reúso

Las aguas de las minas de Greenside y Kleinkopje son de pH neutro, mientras que las aguas de South Witbank y Landau, tienen una alta acidez. Las características variables del agua conllevan a la necesidad de una mezcla y equalización adecuada antes del tratamiento.

La Tabla 29 muestra la calidad del agua residual antes de ingresar a la Planta de Tratamiento de Agua Residual de eMalahleni. (Merta, 2019).

Tabla 29. Calidad del agua residual a tratar

| Parámetro | Unidad | Valor |
|-----------------|------------------------|-------|
| pH | | 2.7 |
| Conductividad | mS/m | 460 |
| Acidez | mg/l CaCO ₃ | 1050 |
| SDT | mg/l | 4930 |
| Ca | mg/l | 660 |
| Mg | mg/l | 230 |
| Na | mg/l | 130 |
| K | mg/l | 13 |
| SO ₄ | mg/l | 3090 |
| Cl | mg/l | 70 |
| Fe | mg/l | 210 |
| Mn | mg/l | 35 |
| Al | mg/l | 40 |

Fuente: Merta, E. (11 de marzo de 2019). Planta de tratamiento de agua eMalahleni. Obtenido de Mine Closure website: <https://mineclosure.gtk.fi/emalahleni-water-treatment-plant/>

El agua tratada cumple con el estándar sudafricano (SANS 0241 Clase 0 agua potable), excepto en turbidez (NTU ~ 1) debido al uso de piedra caliza. La norma establece los límites de turbidez en NTU<1 sobre una base operativa y NTU>5 sobre una base estética, por lo tanto, una ligera turbidez no compromete la seguridad del agua tratada para uso potable. (Merta, 2019).

La Tabla 30 describe los estándares sudafricanos para agua potable.

Tabla 30. Estándar Sudafricano para agua potable Clase 0 SANS 024

| PARÁMETRO | UNIDAD | Clase 0 – Ideal | Clase I – Aceptable | Clase II – Máximo aceptable |
|---|--------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Requerimientos físicos y organolépticos | | | | |
| pH 25°C | pH | 6.0 – 9.0 | 5.0 – 9.5 | 4.0 – 10.0 |
| Conductividad 25°C | mS/m | 70 | 150 | 370 |
| Turbiedad | NTU | 0.1 | 1 | 10 |
| Color | mgPt/l | 15 | 20 | 50 |
| Olor | TON | 1 | 5 | 10 |
| Sólidos disueltos | mg/L | 450 | 1000 | 2400 |
| Sabor | FTN | 1 | 5 | 10 |
| Requerimientos químicos – Macro determinados | | | | |
| Nitrógeno amoniacal | mg/L | 0.2 | 1.0 | 2.0 |
| Calcio Ca | mg/L | 80 | 150 | 300 |
| Cloro CL | mg/L | 100 | 200 | 600 |
| Flúor Fl | mg/L | 0.7 | 1.0 | 1.5 |
| Magnesio Mg | mg/L | 30 | 70 | 100 |
| Nitrato y Nitrito como N | mg/L | 6.0 | 10.0 | 20 |
| Potasio K | mg/L | 25 | 50 | 100 |
| Sodio Na | mg/L | 100 | 200 | 400 |
| Sulfato SO4 | mg/L | 200 | 400 | 600 |
| Zinc Zn | mg/L | 3.0 | 5.0 | 10.0 |
| Requerimientos químicos – Micro determinados | | | | |
| Aluminio AL | µg/L | 150 | 300 | 500 |
| Antimonio Sb | µg/L | 5 | 10 | 50 |
| Arsénico As | µg/L | 10 | 50 | 200 |
| Cadmio Cd | µg/L | 3 | 5 | 20 |
| Cromo Cr | µg/L | 50 | 100 | 500 |
| Cobalto Co | µg/L | 250 | 500 | 1000 |
| Cobre Cu | µg/L | 500 | 1000 | 2000 |
| Cianuro (libre) CN | µg/L | 70 | 70 | 70 |
| Cianuro (Recuperable) CN | µg/L | 70 | 200 | 300 |
| Hierro Fe | µg/L | 100 | 200 | 2000 |
| Plomo Pb | µg/L | 10 | 50 | 100 |
| Manganeso Mn | µg/L | 50 | 100 | 1000 |
| Mercurio Hg | µg/L | 1 | 2 | 5 |
| Níquel Ni | µg/L | 50 | 150 | 350 |
| Selenio Se | µg/L | 10 | 20 | 50 |
| Vanadio V | µg/L | 100 | 200 | 500 |
| Requerimientos químicos - Orgánicos | | | | |
| Carbono orgánico disuelto C | mg/L | 5 | 10 | 20 |

| PARÁMETRO | UNIDAD | Clase 0 – Ideal | Clase I – Aceptable | Clase II – Máximo aceptable |
|----------------------|--------|--------------------|------------------------|-----------------------------------|
| Trihalometanos total | mg/L | 100 | 200 | 300 |
| Fenol | mg/L | 5 | 10 | 70 |

Fuente: SANS 241:1999 (1999). Drinking water (SANS 241: 1999). South African National Standard. South Africa. Recuperado: <http://hwt.co.za/downloads/SANS%20241.pdf>

Volumen de reúso de agua residual

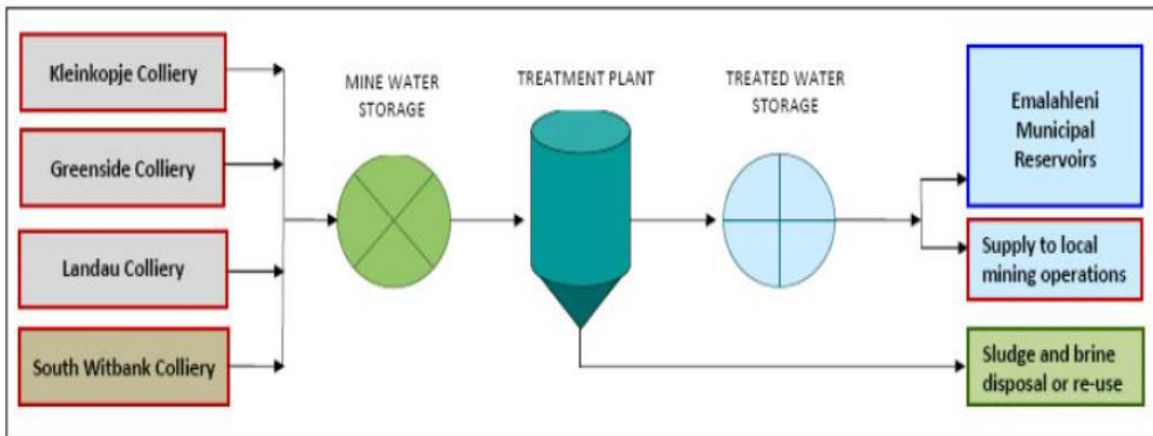
El Municipio de eMalahleni es el principal beneficiario. Según la bibliografía consultada (EPA, 2012), esta región, recibe un total de 5,3 millones de galones (20 megalitros) por día de agua potable, segura y tratada desde la planta de tratamiento, para aumentar el suministro de agua doméstica. El resultado de esta solución se basa principalmente en más de 10 años de investigación por parte de Anglo Coal en opciones de gestión de calidad de agua y tecnologías de tratamiento.

Tecnologías implementadas

El proceso implementado está diseñado para producir agua potable de alta calidad, siguiendo los estándares de la legislación de Sudáfrica (SANS 0241 Clase 0 agua potable), utilizando un proceso de Ósmosis Inversa Precipitante de Alta Recuperación (HiPRO – siglas en inglés – Proceso que consiste en hacer pasar varias veces el agua residual por ultrafiltración y ósmosis, tal como se puede ver en los esquemas abajo referenciados). La característica más importante de este diseño es que utiliza ósmosis inversa para concentrar el agua y producir salmuera sobresaturada de la que se pueden liberar las sales en un simple proceso de precipitación.

La planta está diseñada para tratar 6,5 millones de galones/día (25 megalitros/día) de agua residual proveniente de las minas (EPA 2012), con una recuperación del 99%. El agua tratada es almacenada en dos grandes depósitos de hormigón antes de ser bombeada a un depósito municipal para su distribución en eMalahleni. Anglo Coal, canaliza parte de estas aguas nuevamente hacia sus instalaciones, para uso doméstico y actividades mineras como supresión de polvo. A continuación, se puede observar un esquema general del proceso (Gráfico 35) para el tratamiento y reúso del agua residual de la mina.

Gráfico 35. Esquema general del proceso y usos del agua tratada



Fuente: EPA, U. E. (2012). Guidelines for Water Reuse. Washington, D.C.: CDM Smith Inc. (CDM Smith); Cooperative Research and Development Agreement (CRADA); U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

La planta de tratamiento se divide en tres etapas, a partir de las cuales se puede obtener agua potable con baja salinidad⁴⁷.

Etapa 1:

- Reactores de oxidación y neutralización
- Clarificador
- Ultrafiltración: Eliminación de sólidos suspendidos.
- Osmosis inversa: Desalinización y disminución de los sólidos disueltos totales. (SDT <200mg/L).

Etapa 2:

- Reactores de precipitación
- Hidrociclones
- Clarificador
- Ultrafiltración: Eliminación de sólidos suspendidos.
- Osmosis inversa: Desalinización y disminución de los sólidos disueltos totales. (SDT <200mg/L).

Etapa 3:

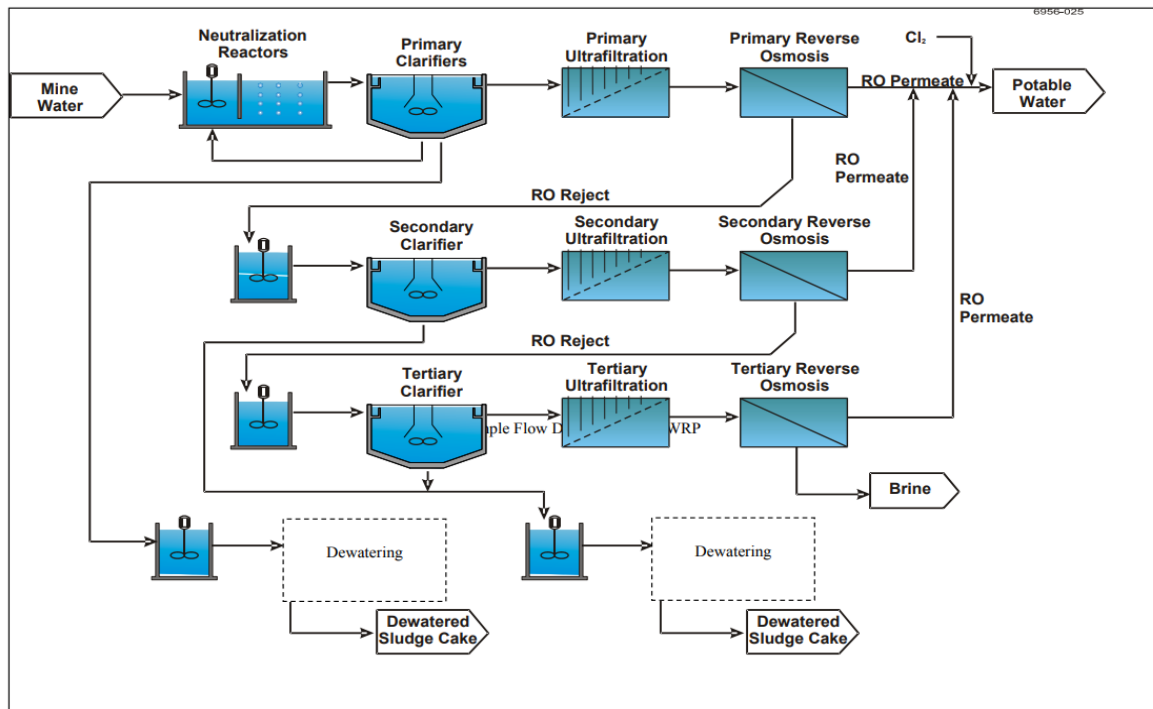
- Reactores de precipitación
- Hidrociclones

⁴⁷ Hutton, B., Kahan, I., Naidu, T., Gunther, P. (2009). Operating and maintenance experience at the Emalahleni water reclamation plant. [PDF Files]. Pretoria, South Africa. Document Transformation Technologies cc. Recuperate: https://www.imwa.info/docs/imwa_2009/IMWA2009_Hutton.pdf

- Clarificador
- Ultrafiltración: Eliminación de sólidos suspendidos.
- Osmosis inversa: Desalinización y disminución de los sólidos disueltos totales. (SDT <200mg/L).

El Gráfico 36 muestra un esquema detallado de la planta de tratamiento de agua residual implementada.

Gráfico 36. Esquema detallado de la PTAR



Fuente: Hutton, B., Kahan, I., Naidu, T., & Gunther, P. (2009). Operating and Maintenance Experience at the Emalaheni Water Reclamation Plant. Pretoria, South África: Document Transformation Technologies CC.

Durante la **etapa 1**, el agua se oxida y se neutraliza mediante la piedra caliza CSIR, el lodo generado se elimina por clarificación. La ultrafiltración actúa como un pretratamiento para la ósmosis inversa, donde la recuperación de permeado es del 65%. El sobrante del proceso de ósmosis inversa se transporta a la **etapa 2** donde la precipitación es seguida por hidrociclones, clarificación y un proceso similar al de la etapa 1 (recuperación de permeado es del 65%). El sobrante del proceso de ósmosis inversa se transporta a la **etapa 3**, que es similar a la etapa 2. La salmuera final se genera en el proceso de ósmosis inversa de la etapa 3. El lodo se envía a los clarificadores para su posterior tratamiento. Merta E. (Sin fecha)

El proceso de tratamiento genera 26,400 galones (100 m³) de salmuera y 100 toneladas (90,700 kg) de residuos de yeso cada día. Anglo Coal está explorando la

posibilidad de reutilizar estos residuos a base de yeso para construcción de edificios, estableciendo un mercado para ello.

Usos del agua tratada

El municipio de eMalahleni es el principal usuario del agua generada en la planta de tratamiento (20 megalitros/d). Los 5 megalitros/d restantes se utilizan en actividades mineras de Anglo Coal en los depósitos de Greensife, Kleinkopje y Landau, p. para supresión de polvo y uso doméstico.

Aspectos financieros

La planta de recuperación de agua de Emalahleni (Sudáfrica) es una instalación de USD 200 millones.

Reúso Industrial

Proyecto de reciclaje de agua en Durban.

(Word Bank Group, 2018)

Ubicación

Durban es la tercera ciudad más importante de Sudáfrica y principal centro comercial del país que depende al igual que otros lugares del mundo de la disponibilidad de los recursos hídricos para su desarrollo económico y social sostenible.

Durante la década de 1990, Durban se enfrentaba a la falta de capacidad de infraestructura para dar un manejo ambientalmente sostenible y seguro a las aguas residuales que diariamente se generaban, debido al rápido crecimiento de la población y el desarrollo económico.

Esta situación generó preocupación en la ciudad, por lo que fue necesario invertir con nueva infraestructura para aumentar la recolección de las aguas residuales y así evitar impactos negativos, tanto en la población como en el medio ambiente. Entre las opciones analizadas para cumplir con el objetivo planteado, se consideró el diseño y construcción de una nueva línea de tubería que llevaría toda el agua residual al mar. Sin embargo, los costos de este proyecto eran muy altos, llevando así a buscar nuevas alternativas que fueran económicamente viables.

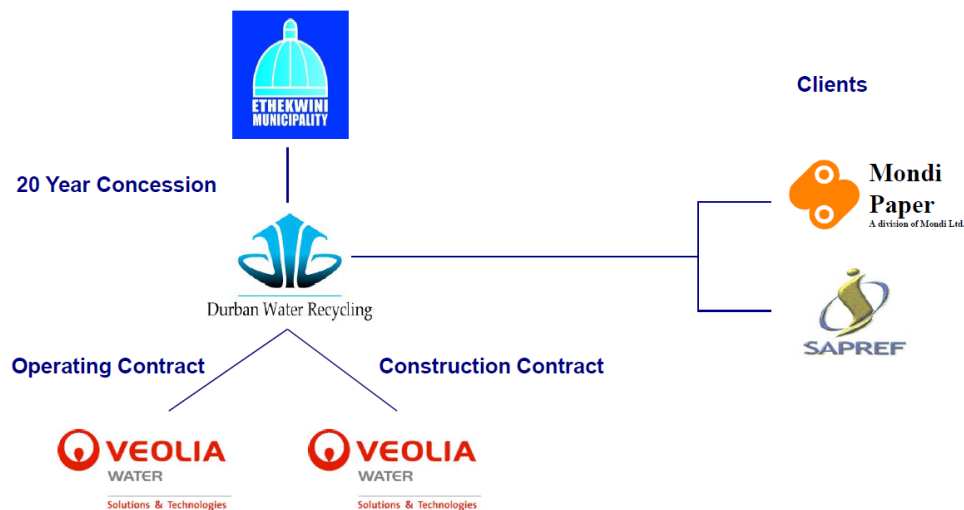
Aspectos Técnicos

La ciudad decidió finalmente, a través de una asociación público-privada (PPP), implementar un proyecto de reciclaje de aguas para fines industriales. Este proyecto es uno de los primeros de su tipo en Sudáfrica y se ha convertido en un ejemplo de gestión sostenible de aguas residuales con múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales para la región. Mondi una industria papelera y SAPREF, una refinería de petróleo, son las dos empresas que expresaron su interés en recibir las aguas residuales tratadas para sus procesos.

El objetivo del proyecto era tratar alrededor de 48 millones de litros por día (aproximadamente el 10% de las aguas residuales de la ciudad) de los cuales el 85% del agua tratada iría a Mondi y el resto a SAPREF. De esta manera, la ciudad realizaba el tratamiento de sus aguas residuales y les daba un segundo uso en actividades industriales, evitando eliminarlas al mar y recuperando parte de la inversión a través de la venta de ésta a las empresas involucradas.

Para suministrar el agua residual tratada según las condiciones de los procesos industriales involucrados, EtheKwini Water Services [EWS] la oficina municipal responsable de la gestión del recurso hídrico en Durban, inició una fase de licitación internacional, la cual fue concedida a Durban Water Recycling (DWR) un consorcio liderado por Veolia, para financiar, diseñar, construir y operar la planta de tratamiento terciario para agua residual por 20 años. El Gráfico 37 describe los diferentes papeles que juegan las empresas vinculadas para el desarrollo de este proyecto.

Gráfico 37. Asociación Público – Privada (PPP). Actores y empresas involucradas



Fuente: Durban Water Recycling. EtheKwini Municipality. Veolia Water. (2018). The Durban Water Recycling Project: Creating shared values between Municipalities and Industry. Durban, South África

Veolia instaló un proceso de tratamiento de agua altamente especializado, diseñado específicamente para cumplir con los requisitos de calidad del agua del principal cliente Mondi Paper para la producción de papel fino. La calidad del agua sigue las exigencias de la norma Sudafricana (SABS 241:1999) que incluye 22 parámetros.⁴⁸

Los logros del proyecto a nivel ambiental se traducen en la reducción del consumo de agua de la ciudad en un 7%, extensión de la vida de la cuenca hidrográfica de la ciudad, reducción de la carga orgánica en un 24% por descargas al mar (emisario submarino), operación del proceso con una eficiencia de utilización del agua en 97,9% y uso del agua no entregada a la industria en comunidades que no tienen este servicio.

Caracterización de las aguas antes y después del reúso

El agua tratada debe cumplir con 32 parámetros especificados. El proceso de lodo activado elimina el 95% de la DQO y el 98% de las cargas de del Nitrógeno amoniacal entrante.

Típicamente las concentraciones de DQO y nitrógeno amoniacal del efluente de la planta de lodo son 15 mg/L y 0.2 mg/L respectivamente. El agua recuperada final alcanza niveles de hierro de 0.04 mg/l, que es cinco veces más bajo que los estándares sudafricanos para agua potable de clase 1 (SABS 241:199) (ver Tabla 30) y se cumple el 96% de los parámetros listados en la norma, proporcionando niveles de calidad totalmente aceptables para el consumo humano.

Volumen de reúso de agua residual incorporada al proyecto

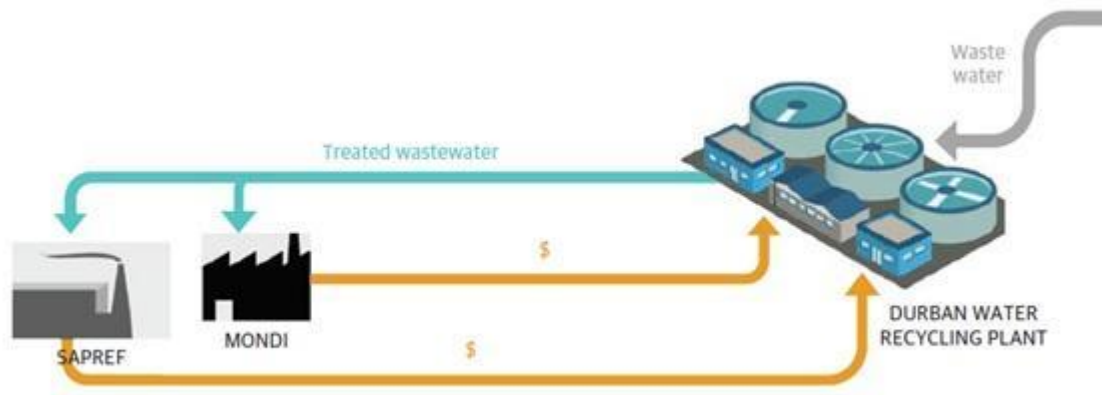
Tras la remodelación de la planta de tratamiento existente para el desarrollo del proyecto se logró una mejora en el proceso de lodos activados, la implementación de un proceso terciario, la renovación del tanque de almacenamiento y la instalación del sistema de recirculación, el conjunto de todos estos cambios, produjo efluentes tratados en 12,1 mgd o 47 megalitros/día, para su reutilización en aplicaciones industriales y la posibilidad de abastecer la demanda de al menos 400.000 personas adicionales en la ciudad. (EPA, 2012)

Aunque las tecnologías de tratamiento de agua residual implementada para el proyecto son bastante estándar, la asociación entre las entidades público-privada permitió lograr los objetivos planteados inicialmente en cuanto a volumen de agua tratada y reciclada.

⁴⁸ Durban Water Recycling. Ethekwini Municipality. Veolia Water. (2018). The Durban Water Recycling Project: Creating shared values between Municipalities and Industry. Durban, South Africa.

El Gráfico 38 muestra un esquema sencillo de las partes involucradas en el proceso.

Gráfico 38. Partes involucradas en el proceso.



Fuente: Word Bank Group. (2018). Wastewater: From Waste to Resource, the Case of Durban, South Africa. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.

Tecnologías implementadas en el tratamiento de las aguas residuales

El agua es tratada a través de un tratamiento secundario y terciario formado por las siguientes estructuras (World Bank Group, 2018):

Tratamiento secundario: Lodos activados convencional y tanques de sedimentación secundaria

En el tratamiento secundario, el efluente de los tanques de sedimentación primarios, denominado agua de alimentación, alimentan a la planta de lodo activado, tras este proceso, el agua de alimentación se somete a la sedimentación lamelar en la primera de las tres etapas del proceso de tratamiento.

Para coagular sólidos en el agua de alimentación, se dosifica una sal metálica antes de agregar polímeros para mejorar la floculación⁴⁹.

Tratamiento terciario:

- Decantador lamelar
- Adición de cloruro de poli aluminio (PAC)
- Lechos de doble medio filtrante
- Ozonización
- Adsorción de carbón activado granular (GAC),

⁴⁹ Veolia (Sin fecha). Durban, eThekweni water services (EWS), KwaZulu-Natal. Durban, South África. Recuperado: http://www.veoliawatertechnologies.co.za/medias/case-studies/Durban_eThekweniWaterServices_SouthAfrica_Case_Study.htm

- Desinfección con cloro

El primer paso en el proceso de tratamiento terciario (Decantador lamelar) permite la separación de los elementos semipesados y pesados en suspensión que llevan las aguas residuales.

La adición del poli aluminio (PAC) se emplea para eliminar el hierro. Por su parte el paso de doble filtración elimina los sólidos que no se hayan podido eliminar en pasos anteriores y el precipitado del hierro generado por la adición del (PAC), finalmente en la ozonización, se rompen los compuestos orgánicos no biodegradables restantes, incluidos los compuestos que causan color. (EPA, 2012).

Para mejorar aún más la calidad del agua, se utilizan filtros de carbón activado, se clora y se transporta a un tanque de almacenamiento para su distribución a clientes industriales (Veolia, sin fecha). En el Gráfico 39 se puede observar una vista superior de la planta⁵⁰.

Gráfico 39. Vista superior de la planta de tratamiento de agua residual.



Fuente: Averda. (15 de junio de 2018). Innovative wastewater treatment plant launched in Durban. Obtenido de Averda Waste Management: <https://averda.co.za/news/innovative-wastewater-treatment-plant-launched-durban/>

Usos del agua tratada en proyecto

El agua tratada es ampliamente utilizada para la producción de papel por la empresa Mondi y para la refinería de petróleo por SAPREF, adicionalmente se ven

⁵⁰ Averda (2018). Innovative wastewater treatment plant launched in Durban. Recuperado: <https://averda.co.za/news/innovative-wastewater-treatment-plant-launched-durban/>

beneficiadas alrededor 400.000 personas del sector, ya que parte del agua tratada es entregada al sector domiciliario cercano a la Planta para su uso en sanitarios y riego de jardines. (EPA, 2012).

Aspectos Financieros⁵¹

El costo total del proyecto que incluye la construcción para la nueva planta terciaria, compra y actualización de los activos de servicios municipales utilizados para el proyecto y sistema de tuberías necesario, fue de alrededor 4.824.000,00 USD.

El sector privado proporcionó la totalidad de la Financiación necesaria para el proyecto. DWR también asumió los riesgos de satisfacer las necesidades de calidad del agua por los dos usuarios industriales. Por lo tanto, la empresa municipal no incurrió en ningún costo de capital adicional para los contribuyentes.

La demanda garantizada de aguas residuales tratadas de los dos usuarios industriales hizo el proyecto económicamente atractivo y permitió que DWR emprendiera los riesgos de inversión.

Dificultades y Retos

El caso de Duraban es un ejemplo de éxito e innovador PPP para mejorar la sostenibilidad de gestión de aguas residuales, minimizando el impacto a medioambiente y tener múltiples beneficios para la comunidad.

La ciudad pudo convertir una situación de desafío en una oportunidad, aprovechando las condiciones locales y el pensamiento innovador que resultó en una solución beneficiosa para todos los interesados.

El proyecto muestra que, si las partes interesadas correctas están involucradas y comprometidas, es posible alcanzar los principios de economía circular.

Aspectos Institucionales

A continuación, se presenta una descripción de las entidades que tienen competencia en el tema de recurso hídrico.

El Ministerio de Agua y Saneamiento (DWS por sus siglas en inglés): El DWS es el principal responsable de la formulación y ejecución de la política para la gestión de los recursos hídricos, así como el suministro de agua potable en Sudáfrica. Se rige por dos leyes, la Ley Nacional del Agua (1998), y la Ley de Servicios de Agua

⁵¹ Wastewater: From Waste to Resource. The Case of Durban, South Africa Water Global Practice

(1997). También tiene la responsabilidad por los servicios de agua que son prestados por las administraciones locales.

Agencias de Gestión de los Recursos Hídricos: Para llevar a cabo la gestión eficiente de los recursos hídricos disponibles, existen nueve áreas de gestión de agua que abarcan todo el país, denominadas Water Management Áreas (WMA). Todas dependen directamente del DWS, pero trabajan de manera descentralizada.

Municipalidades: Las entidades encargadas de la distribución del agua y el saneamiento son las Water Service Authorities (WSA) que, según el Water Services Act, son las municipalidades. Estas actúan directa o indirectamente a través de empresas de su propiedad o mediante empresas privadas⁵². Existen 278 municipalidades: 8 metropolitanas, 46 distritos y 226 locales. Sin embargo, de todas ellas sólo hay 152 municipalidades con capacidad para actuar como WSA.

Confederaciones de Agua: Existen 9 Confederaciones de Agua (Water Boards, en inglés), que son de propiedad del Gobierno sudafricano, las cuales desempeñan un papel fundamental en el sector de agua del país. Son las encargadas de la operación de presas, infraestructura de abastecimiento de agua y ciertos sistemas de aguas residuales. Distribuyen agua bruta y potable a través de grandes distancias a múltiples usuarios mediante sistemas de abastecimiento de agua regionales. Esta función es totalmente controlada por el DWS.

Trans Caledon Tunnel Authority (TCTA): Es una entidad propiedad del Gobierno cuya misión es financiar e implementar mega infraestructuras de agua bruta. Se creó en 1986 para desarrollar el Lesotho Highlands Water Project (LHWP), uno de los proyectos hídricos más importantes en la historia de Sudáfrica. Se encarga de la implementación de infraestructura de agua bruta a granel; diseño de proyectos; gestión de proyectos; gestión de la deuda; gestión del conocimiento y gestión de tesorería.

Ministerio de Medio Ambiente (Department of Environmental Affairs): El Ministerio de Medio Ambiente, aunque no es el encargado de realizar las evaluaciones del impacto medioambiental asegura que sean realizadas para proyectos de servicios de agua, así mismo es responsable de fomentar la conservación, las tecnologías limpias y la minimización de residuos.

Comisión Nacional de Planificación (National Planning Commission): Fue establecida por la presidencia y se encarga de desarrollar una visión a largo plazo

⁵² Municipal Structure Act; Water Services Act 1997 Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Johannesburgo

y un plan estratégico y de asesorar sobre temas transversales que inciden en el desarrollo del país a largo plazo.

Otros: Comisión de investigación del agua (Water Research Commission), el Instituto de Agua de Sudáfrica (Water Institute of South), el Instituto de funcionarios financieros municipales (Institute of Municipal Financial Officers), el Instituto de ingenieros civiles sudafricanos (the South African Institute of Civil Engineers) y el Instituto de ingenieros municipales sudafricanos (Institute of Municipal Engineering of South Africa).

Aspectos Legales

La escasez de agua potable en Sudáfrica es evidente debido a su suelo árido y su ubicación geográfica. Esto ha obligado a buscar fuentes adicionales para usos industriales y agrícolas diferentes al agua potable o cruda. Por esta razón, se han visto en la obligación de encontrar en el reúso del agua una posible fuente hídrica.

Por ejemplo, en Sudáfrica, Beaufort West es una ciudad que utiliza agua reusada para atender la demanda de agua potable, aportando más del 20% al sistema de agua potable. En este país (Caso Durban⁵³) se pueden ver proyectos exitosos de participación privada (PPPs o Asociaciones Público-Privadas -APP) en donde se deja en evidencia que hay un apetito de la industria para adquirir agua reusada, a tal punto que permitió la ejecución de un proyecto APP con las complejidades que ello conlleva en materia de financiación, entre otros. Adicionalmente, hay otros ejemplos en África como Windhoek, Namibia, en donde el agua reusada es utilizada en su mayoría, incluso, para consumo humano.

Sudáfrica recientemente está buscando la forma de desarrollar nuevas infraestructuras debido a la escasez de agua potable⁵⁴, entre ellas, tecnologías que permitan el reúso del agua en gran escala. Los mismos documentos de política (*National Water Resource Strategy*) muestran la existencia de un rezago de infraestructura de tecnología de última generación que permita cumplir con los altos estándares de calidad del efluente para el reúso del agua. Este rezago lo percibe la gente, pues la principal preocupación en Sudáfrica para la implementación de una política mucho más agresiva en cuanto al reúso es la percepción de la comunidad, lo cual ha generado en muchas ocasiones resistencia para lograr que se implementen medidas de reúso directo de agua para el consumo humano, como es el caso de Windhoek en Namibia⁵⁵.

⁵³ World Bank Group. (2018). Wastewater: From Waste to Resource, the Case of Durban, South Africa. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank

⁵⁴ ICEX España Exportación e Inversiones. Ficha Técnica. "El agua en Sudáfrica". 2018.

⁵⁵ Tomado de <https://cer.org.za/wp-content/uploads/2013/07/NWRS2-Final-email-version.pdf>

A pesar de los retos con los que cuenta Sudáfrica se puede decir que tiene una política madura y de largo plazo (desde casi el año 2011) sobre el reúso del agua, identificando esta fuente como una fuente adicional que ayuda a combatir la escasez del recurso hídrico.

La experiencia del caso sudafricano permite observar principalmente lo siguiente:

- **Ejecución de proyectos de participación público-privada (PPP):** El país está abierto a la ejecución de proyectos de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales mediante esquemas PPP, por lo que se logra ampliar la capacidad de tratamiento y reúso del país en condiciones atractivas para inversionistas privados, en función de los intereses y planes diseñados para el sector del agua.
- **Diversificación de las actividades que reúsan agua tratada:** Las condiciones de escasez en Sudáfrica obligan a recurrir al reúso de agua para actividades de toda clase: agricultura, usos urbanos, industria y minería. Esto permite contar con un mercado más amplio de interesados por el producto.

A continuación, se presenta una matriz con los principales instrumentos normativos relacionados:

Tabla 31. Matriz normativa para Sudáfrica

| Norma | Objeto |
|---|--|
| National Water Act - Act No. 36 of 1998 - Ley 36 de 1998 | Esta Ley tiene por objeto que el agua de Sudáfrica se encuentre protegida, usada, desarrollada, conservada, manejada y controlada. Para efectos del agua reusada, y dependiendo del uso que se le vaya a dar a la misma, requiere de las autorizaciones y licencias que trae esta Ley. |
| National Environmental Management Act - Act 107 of 1998 - Ley 107 de 1998 | Esta Ley es amplia en materia ambiental, sin embargo, para efectos del agua reusada, regula las autorizaciones requeridas para poder utilizar otras fuentes diferentes al agua potable (p.ej. agua reusada) en usos tales como: industriales agrícolas, entre otros. |
| Water Services Act - Act No. 108 of 1997 - Ley 108 de 1997 | Esta Ley tiene por objeto regular el sector de agua potable (institucionalidad, tarifas, entre otros) y regular el agua potable como un derecho. |
| National Water Resource Strategy - Estrategia Nacional | Es un documento expedido por el Departamento de Agua, en donde se define la política general de agua para Sudáfrica. Lo anterior, se encuentra sustentado en el "National Water Act". |

| Norma | Objeto |
|-------------------------------------|--|
| frente al agua como recurso natural | Frente al reúso, este documento de política trae aspectos de mucha importancia tales como: i) la visión de largo plazo en Sudáfrica frente al reúso del agua, ii) en el Anexo D, se enuncian tecnologías aceptables para cumplir los estándares de descarga para el reúso establecidos por las autoridades Sudafricanas. |

Conclusiones

- Sudáfrica se encuentra entre los 50 países con menos precipitaciones del mundo, y es considerado uno de los que tienen niveles de escasez de agua muy altos. Esta situación ha motivado al desarrollo de diferentes técnicas de reutilización de agua con el fin de disminuir las afectaciones provocadas por la falta de recursos hídricos. El país ha sido pionero en el reciclaje y tratamiento interno de aguas residuales desde 1980, para reducir la demanda.
- Entre los proyectos investigados se evidencia una fuerte participación de la industria, tanto como receptor de aguas residuales domésticas tratadas, como fuente de suministro de agua con calidad de agua potable después el tratamiento de sus aguas residuales industriales, para consumo de comunidad.
- Los proyectos tuvieron un enfoque más amplio sobre la sostenibilidad del agua a más largo plazo en las zonas de estrés hídrico y de gestión sostenible de aguas residuales con múltiples beneficios ambientales, económicos y sociales para la región.
- El tratamiento de las aguas residuales de origen minero para consumo humano cumple con legislación de Sudáfrica (SANS 0241 Clase 0 agua potable) e incorpora sistemas de tratamiento de alta tecnología en varias fases con reactores de oxidación y neutralización, reactores de precipitación, clarificadores, ultrafiltración, hidrociclones, clarificador y ósmosis inversa.
- El tratamiento de las aguas residuales de origen doméstico para uso industrial es de lodos activados convencional, con tanques de sedimentación secundaria con tratamiento terciario seguido de una adición de cloruro de poli aluminio (PAC), lechos de doble medio filtrante, ozonización, adsorción de carbón activado granular (GAC) y desinfección con cloro. El tratamiento está diseñado específicamente para cumplir con los requisitos de calidad del agua del principal cliente Mondi Paper para la producción de papel fino. La calidad del agua sigue las exigencias de la norma sudafricana (SABS

241:1999), que proporciona también niveles de calidad totalmente aceptables para el consumo humano.

- Los montos de inversión para tratar 30 millones de litros/día de drenaje ácido de rocas en el Proyecto de eMalahleni con destinación de 16 millones de litros /día para agua potable fue de 200 millones USD. Los montos de inversión para tratar 48 millones de litros/día de las aguas residuales de Durban fue de 4.824.000 USD.
- Sudáfrica cuenta con 824 sistemas de tratamiento de aguas residuales en 152 municipios, los cuales tienen la capacidad de diseño colectivo para recibir 6.5 mil millones de litros de aguas residuales por día, caudal que está siendo utilizado en su totalidad para el tratamiento de estas aguas.
- Los casos exitosos documentados se desarrollaron en zonas de estrés hídrico, producido por la creciente población y la falta de precipitaciones, que generaron una presión sobre el suministro de agua.
- El Ministerio de Agua y Saneamiento (WWS por sus siglas en inglés) es la entidad responsable de la formulación y ejecución de la política para la gestión de los recursos hídricos.
- Para llevar a cabo la gestión eficiente de los recursos hídricos disponibles en el país, existen nueve áreas de gestión de agua, denominadas Water Management Áreas (WMA).
- Otras entidades involucradas en el tema de aguas residuales en Sudáfrica son el Ministerio del Medio Ambiente, las Confederaciones de Agua, la Comisión de Investigación del Agua, El Instituto del Agua de Sudáfrica y las Municipalidades.
- El país está abierto a la ejecución de proyectos de infraestructura para el tratamiento de aguas residuales mediante esquemas PPP, por lo que se logra ampliar la capacidad de tratamiento y reúso del país en condiciones atractivas para inversionistas privados, en función de los intereses y planes diseñados para el sector del agua.
- Las condiciones de escasez en Sudáfrica obligan a recurrir al reúso de agua para actividades de toda clase: agricultura, usos urbanos, industria y minería. Esto permite contar con un mercado más amplio de interesados por el producto.

3.2.2.2. Israel

Generalidades

Israel está ubicado en la costa sureste del Mediterráneo, tiene una población de 8.972.000 habitantes y una extensión de 20.325 Km² (Oficina de Información Diplomática, 2019).

Es un Estado centralizado, territorialmente se estructura mediante una administración local compuesta de municipios o ciudades, consejos locales y consejos regionales. Administrativamente Israel se divide en 6 distritos: Jerusalén, Haifa, Tel Aviv y los distritos del norte, centro y sur.

Gráfico 40. Mapa de Israel



Fuente: Oficina de información diplomática, Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, Ficha de país Israel, 2019

El país está dividido en cuatro regiones: (FAO, 2008)

- La llanura costera del mediterráneo se extiende desde la frontera libanesa en el norte hasta la Franja de Gaza en el sur.

- Las colinas centrales o región montañosa central, al norte de esta región se encuentran las montañas y colinas de alta Galilea y baja Galilea.
- El valle de Jordán (punto más bajo de la tierra - 400 metros bajo el nivel del mar), es una pequeña parte de los 6 500 km de largo de la grieta sirio-africana oriental, está dominado por el río Jordán, el lago Tiberíades (también conocido como el Mar de Galilea), y el Mar Muerto.
- El desierto de Negev, zona desértica que cubre alrededor de unos 12.000 km², más de la mitad de la superficie total de Israel, es una extensión del Desierto del Sinaí.

Israel es uno de los países con mayor escasez de agua en el mundo. Bajo un radio de 200 km, la precipitación anual varía entre 600 mm en el Norte a 150 mm en el Sur, con lo cual la mayor superficie del país se caracteriza por tener zonas semiáridas y áridas. Alrededor del 60% del país es clasificado como árido. (FAO, 2008).

Durante el invierno (diciembre – febrero), época del año caracterizada por fuertes lluvias, se genera el 75% de la precipitación anual, de la cual aproximadamente el 70% se pierde en evaporación; alrededor del 25% se infiltra en las aguas subterráneas o permanece en el suelo para las plantas y cultivos; y sólo el 5% fluye como agua superficial. Se presentan inundaciones cortas pero intensas que contienen hasta un 9 % de sólidos en suspensión, lo cual dificulta el almacenamiento y la reutilización de los flujos que generan.

Disponibilidad y uso de agua

El río Jordán es el mayor depósito natural de agua dulce del país y proporciona del 20 al 30% del agua fresca. Así mismo existen otras fuentes de agua dulce, además de la precipitación, que abastecen la mayor cantidad de demanda para el uso industrial, doméstico y agrícola que se encuentran son (FAO, 2008):

- **Lago Kinneret o Lago Tiberíades (el Mar de Galilea)**

Es el único lago natural de agua dulce de Israel. El área de captación del lago es de 2.730 km² y la superficie del lago es de 165 km² con un volumen de almacenamiento estimado de 710 millones de m³. Es considerado el lago de agua dulce más bajo del mundo, encontrándose a 209 metros debajo del nivel del mar.

La entrada anual promedio total de agua asciende a 1 km³, de los cuales unos 250 millones de m³ sirven a los consumidores en la región, alrededor de 450 millones de m³ se extraen del lago para servir a los consumidores en todo el país a

través del National Water Carrier (Acueducto Nacional de Israel) y alrededor de 300 millones de m³ se pierden por evaporación.

- **El acuífero costero**

Es un acuífero de arenisca que se extiende a lo largo de 120 kilómetros de la Costa Mediterránea que se recarga naturalmente por precipitación y artificialmente por agua del National Water Carrier (Acueducto Nacional de Israel), efluentes y exceso de agua de riego que se filtra desde usos agrícolas, industriales y domésticos de la tierra, así como de arroyos y wadis⁵⁶.

El acuífero también es un depósito de almacenamiento ya que las capas de arenisca retienen el agua de manera eficiente. Tiene una recarga media anual de 250 millones de m³ además de 50 millones de m³ de agua de drenaje agrícola.

- **El acuífero de montaña (Yarkon -Taninim)**

Es un acuífero de piedra caliza que subyace en las estribaciones del centro del país. La cuenca se compone de tres subacuíferos: la cuenca occidental, conocida como el acuífero Yarkon Taninim, fluye hacia el norte y el oeste desembocando en los manantiales de Taninim en la costa mediterránea, mientras que las cuencas del noreste y este desembocan en los manantiales de Beit Shean, el valle del Rift de Jordania y mar muerto.

El acuífero de montaña se regenera por precipitación con recargas anuales renovables promedio de aproximadamente 350 millones de m³. Acuíferos relativamente más pequeños se encuentran en el oeste y este de Galilea, la grieta del Jordán y el valle de Arava.

Los principales sectores consumidores del agua disponible en Israel son el agrícola, doméstico e industrial, donde entre el 60 y 72% del consumo total se utiliza para la agricultura. Cerca del 90% de los recursos de agua disponibles en Israel han sido incorporados a un sistema único.

Desde que Israel se estableció como Estado en 1948, ha tenido un rápido crecimiento poblacional, que sumado a los bajos niveles de precipitación lo pone en una situación crítica, la cual se describe de la siguiente manera:

"El volumen total renovable de agua per cápita en Israel es de 276 metros cúbicos por año, que es aproximadamente la mitad de la "línea roja de escasez"

⁵⁶ Wadis: Lecho de río seco que contiene agua solo cuando llueve intensamente

de 500 metros cúbicos por año, lo que la define en situación de escasez de agua" Troop y Jägerskog (2006)" citados en el documento "Water management in Israel

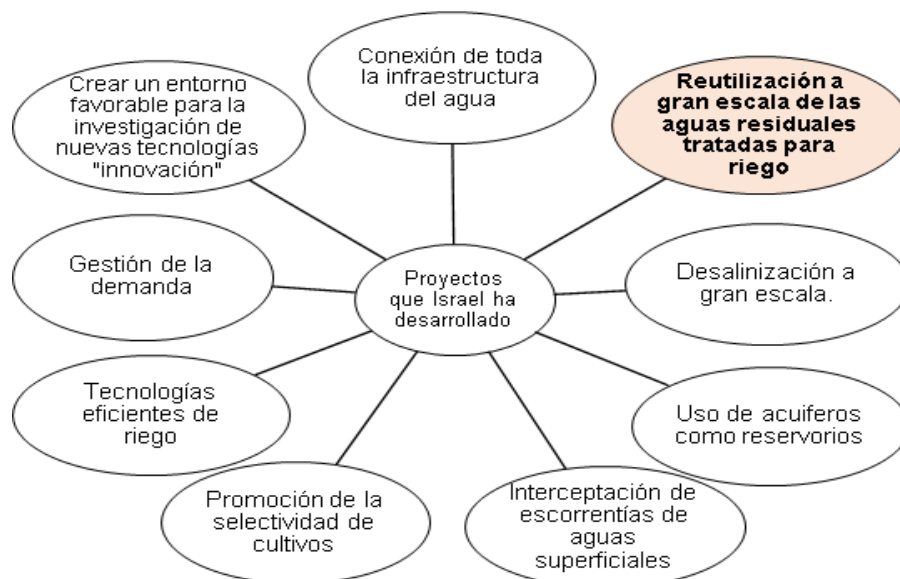
La situación que ha enfrentado Israel durante las últimas décadas en cuanto al recurso hídrico, su poca disponibilidad y continuo crecimiento económico, lo ha obligado adaptarse y diseñar sistemas que le permitan lograr la seguridad de la oferta hídrica, a pesar de la extrema escasez. Por lo anterior, el país se reconoce como un líder a nivel mundial en cuanto al reúso del agua, siendo esta utilizada para actividades domésticas; industriales; y en mayor medida en el riego agrícola (87%).

Descripción del(os) Proyecto(s)⁵⁷

Hay nueve elementos o innovaciones importantes que se deben tener en cuenta en el análisis del proceso que ha implementado Israel para la gestión integral del agua, que consisten en proyectos desarrollados individualmente, pero integrados al final en todo un conjunto de acciones que tienen un único objetivo: asegurar la oferta del recurso hídrico para la población y la supervivencia.

Las iniciativas que se han llevado a cabo se presentan en el Gráfico 41, entre las cuales se incluye la "Reutilización a gran escala de las aguas residuales tratadas para riego".

Gráfico 41. Proyectos desarrollados por Israel



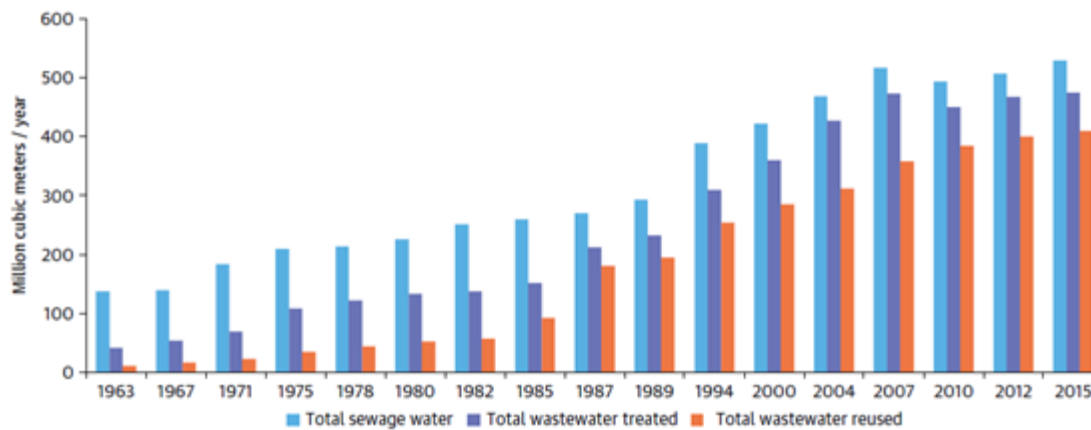
Fuente: World Bank Group. 2017

⁵⁷World Bank Group. 2017. Water Management in Israel. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/657531504204943236/pdf/Water-management-in-Israel-key-innovations-and-lessons-learned-for-water-scarce-countries.pdf>

Drenaje agrícola

La iniciativa “Reutilización a gran escala de las aguas residuales tratadas para riego” ha crecido durante los últimos años, desde su comienzo en 1963. En el recuadro siguiente se puede observar cómo la proporción de aguas residuales tratadas y reutilizadas han aumentado hasta un 87% para el año 2015, lo cual representa, más de 300 MMC al año tratados y reusados. (Ver Gráfico 42). En los siguientes ítems se ampliará esta información indicando aspectos técnicos, económicos e institucionales, importantes para entender la naturaleza de la iniciativa.

Gráfico 42. Total, aguas residuales generadas, tratadas y reusadas en Israel



Sources: Israel 2012; Israel Water Authority website.

Fuente: World Bank Group. 2017

Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Shafdan

Desde su puesta en marcha en 1989, el proyecto emblemático de Israel para la reutilización de efluentes con fines agrícolas ha sido la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Shafdan (ver Gráfico 43), en la cual se realiza un tratamiento terciario después de un tratamiento biológico secundario del efluente que es entregado a agricultores en el sur del desierto de Negev. La PTAR de Shafdan trata y reusa más de 140 MMC de agua residual por año, procedentes de Tel Aviv y siete ciudades vecinas (13 municipios), que en su conjunto forman una población aproximadamente de 2,5 millones de personas (World Bank Group. 2017).

Gráfico 43. Registro fotográfico planta de tratamiento de agua residual de Shafdan



Fuente: Tomado de <https://www.shtang-int.com/shafdan?lang=es>

Características de las aguas

Caracterización del agua antes y después del tratamiento antes del proceso de reúso⁵⁸

El agua residual que llega a Shafdan es principalmente de origen doméstico, sólo el 10% del total del agua es de origen industrial. En la Tabla 32 se muestra las características fisicoquímicas del agua recibida en la PTAR y su calidad después del tratamiento, cuyos valores se comparan con la regulación expedida por el Comité INBAR en cuanto a las propiedades que deben tener las aguas residuales tratadas para reúso en irrigación de cultivos.

Tabla 32. Calidad del agua después del tratamiento de suelo acuífero (SAT) en Shafdan

| Parámetro | Und | Agua residual | Después de sat | Estándar agua residual para reúso según el comité inbar de Israel |
|-----------|-----|---------------|----------------|---|
| DBO | ppm | 430 | <0,5 | 10 |
| DQO | ppm | 1060 | 10 a 20 | 100 |

⁵⁸ Sustainable Water Integrated Management (SWIM) - Support Mechanism Project funded by the European Union. 2013. Documentation of best practices in wastewater reuse in Egypt, Israel, Jordan & Morocco. Recuperado de http://www.swim-sm.eu/files/Best_Practices_in_WW_Reuse.pdf

| Parámetro | Und | Agua residual | Después de sat | Estándar agua residual para reúso según el comité inbar de Israel |
|--------------------|-----------|---------------|----------------|---|
| SST | ppm | 380 | <0,1 | 10 |
| Total Nitrógeno | ppm | 65 | 5 a 10 | 25 |
| NH4 | ppm | 35 | 0,1 | 20 |
| UV abs | cm-1*10-3 | 450 | 25 | - |
| COD | ppm | 70 | 2 a 4 | - |
| Coliformes Totales | N/100ml | 1,1E+08 | 0 | - |
| Coliformes Fecales | N/100ml | 1,2E+07 | 0 | 10 |
| Mn | ppb | 50 | 30-500 | 200 |
| Fe | ppb | 1100 | 10-100 | 2000 |

Fuente: Sustainable Water Integrated Management (SWIM) - Support Mechanism Project funded by the European Union. 2013

La calidad del agua que es tratada en Shafdan es una de las de mejores en Israel, por los procesos utilizados y la tecnología implementada que permite superar los objetivos propuestos, permitiéndole ser reusada sin restricciones en diferentes cultivos para la agricultura.

Características de los sistemas incorporados al programa de reúso

Volumen de reúso de agua residual o lluvia incorporada al Proyecto

Más de 140 MMC de agua anualmente son bombeados desde la PTAR de Shafdan hacia los cultivos vecinos durante épocas de sequía, lo cual constituye aproximadamente el 9% del consumo de agua nacional y alrededor del 35% del consumo de agua en la parte sur del país (Quipuzco Ushñahua, 2004), (Water Scarcity Solutions, 2016).

Tecnologías implementadas

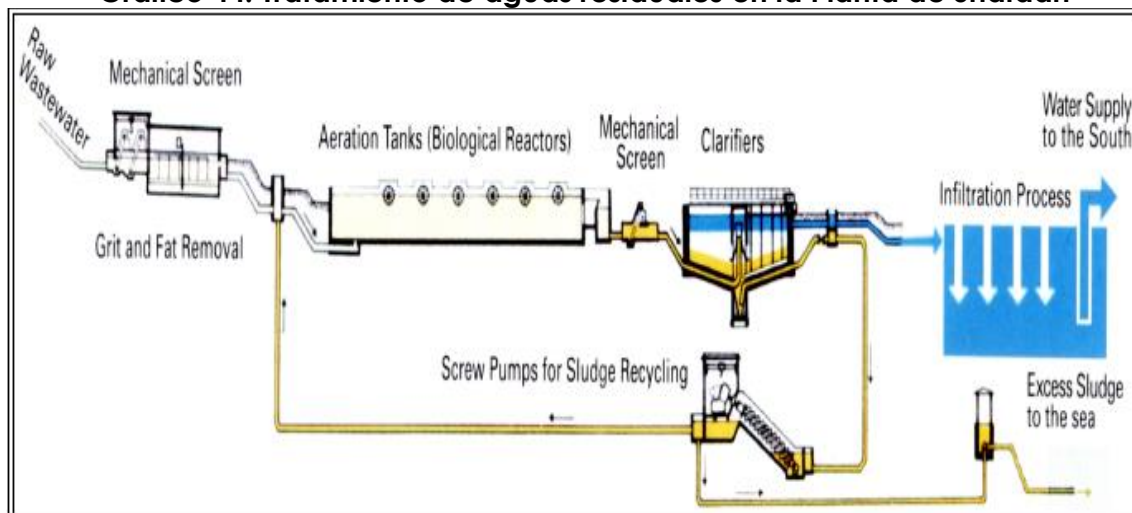
(CONAGUA, 2016), (Quipuzco Ushñahua, 2004)

La PTAR de Shafdan, como otros sistemas de tratamiento de aguas residuales de alta eficiencia, cuentan con unidades convencionales de tratamiento secundario y terciario, a la que se le ha incorporado otros sistemas complementarios. Las unidades con que se cuenta son:

- Rejillas
- Desarenador.
- Remoción de grasas.
- Tanque de lodos activados con zonas aerobias y anóxicas con el fin de obtener una remoción simultánea de nitrógeno y DQO por medio de la nitrificación y desnitrificación
- Clarificadores.
- Sistema de manejo de lodos para su reciclaje
- Tratamientos extensivos complementarios para reuso en irrigación

El Gráfico 44 muestra un esquema del sistema implementado para tratamiento de las aguas residuales con esa destinación:

Gráfico 44. Tratamiento de aguas residuales en la Planta de Shafdan



Fuente: Valoración de las aguas residuales en Israel como recurso agrícola

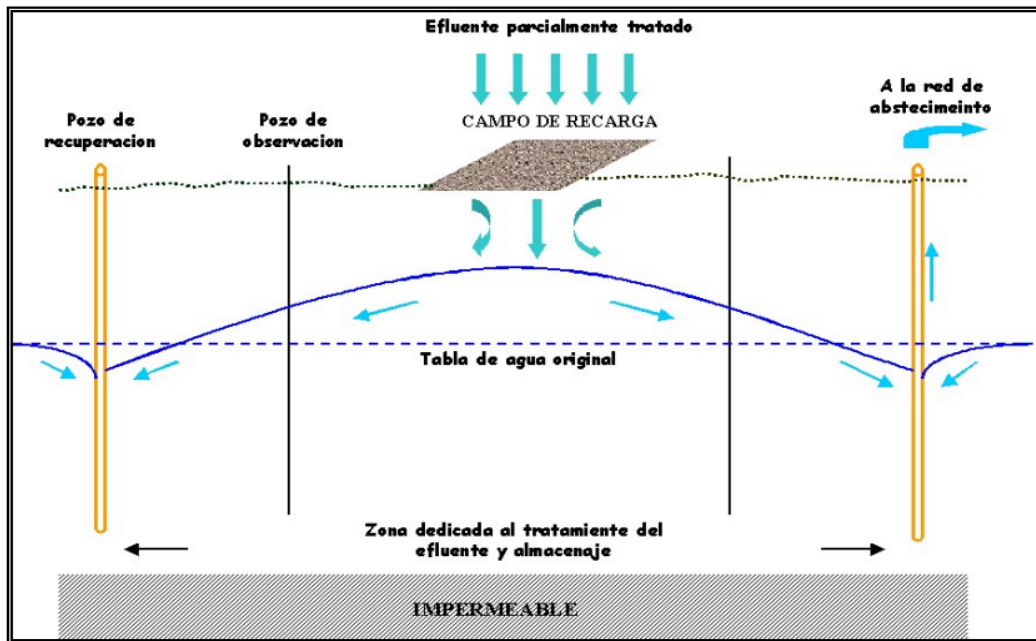
El tratamiento extensivo complementario para reuso en irrigación en Shafdan se realiza mediante **Tratamiento de suelo acuífero (SAT)**, que consiste en llevar el efluente a campos de infiltración de dunas de arena de un acuífero de agua subterránea, el cual tiene una zona de recarga entre los 25 y 60 ha. Este proceso permite que las aguas se filtren naturalmente a través de varias capas de suelo para evitar que las aguas del acuífero se contaminen y existe una separación entre los efluentes tratados y el agua del acuífero.

El SAT cumple una triple función: filtra, desinfecta y almacena el efluente infiltrado alrededor de 400 días. Todo esto se da tras haberse tratado previamente el agua residual en unidades de pretratamiento, tanques de aeración y clarificadores.

Una vez el agua cumple el tiempo establecido en el proceso, es bombeado y canalizado al sur de Israel a unos 90 km de distancia, contribuyendo al desarrollo

agrícola. La calidad del efluente es similar a la del agua potable cumpliendo con los estándares establecidos. Este sistema puede remover eficientemente en los primeros 60 – 100 cm de la capa de tierra, parámetros como el nitrógeno, fósforo, materia orgánica, una variedad de metales pesados, elementos tóxicos, bacterias, patógenos y virus. La planta trata más de 100 MMC anualmente. En el Gráfico 45 se adjunta esquema del tratamiento SAT.

Gráfico 45. Esquema del sistema de tratamiento SAT.



Fuente: Quipuzco, L. (Sin fecha).

Aunque el sistema (SAT) implementado en Shafdan ha sido uno de los ejemplos a seguir en el país, después de más de treinta años realizando filtración natural a través de las dunas, hay indicios de deterioro en la interfaz que ha generado una obstrucción la cual es causada por diferentes aspectos físicos y biológicos y ocasiona una disminución en la capacidad del proceso. Esto ha llevado a que los técnicos busquen nuevas áreas dónde se pueda llevar a cabo esta actividad, además de la instalación de un paso adicional con nanofiltración con membranas de 0.001 – 0.008 micras antes del acuífero, aumentando la velocidad de filtración de 2 m/d a 12 m/d y reduciendo los tiempos de retención aproximadamente diez días (Water Scarcity Solutions, 2016)

Otro sistema de tratamiento de agua residual de menor escala, pero igualmente importante en Israel, se encuentra ubicado en el complejo Ha Kishon en el área metropolitana de Haifa y utiliza un sistema de "**Tratamiento de reservorios profundos – DRT**", que consiste en reservorios de estabilización (8 a 15 m de profundidad), para almacenamiento y purificación de efluentes parcialmente tratados provenientes de lagunas aeróbicas y anaeróbicas, este sistema puede

remover el 90% de la DBO, detergentes, 3-4 órdenes de magnitud de coliformes fecales y otros contaminantes. Allí unos 25 MMC anuales de efluentes tratados biológicamente son conducidos a los reservorios de estabilización de 12 MMC en volumen. El agua tratada es reusada para irrigación de cultivos no comestibles. (Quipuzco, L. Sin fecha)

El agua tratada en Shafdan es utilizada para el riego de cítricos, zanahorias, papas, lechugas, trigo y cultivo de flores. Más del 60% de la agricultura en Negev se riega con agua tratada en la PTAR de Shafdan.

Dificultades y retos

El trabajo conjunto entre cada uno de los actores que hacen parte del proyecto es importante, al igual que la voluntad política para regular el reúso del agua residual tratada e incentivar su aplicación en actividades agrícolas a través de la disminución en los precios.

Sin subsidios significativos o una gran inversión para lograr un buen tratamiento terciario, transportar y almacenar el agua, no es posible realizar este tipo de proyectos, puesto que como lo ha demostrado Israel, es necesario para cubrir los altos costos que se generan.

La reutilización de aguas residuales en Israel es la única parte del ciclo que no ha logrado la recuperación del costo total a través de las tarifas.

La implementación de todo un ente regulatorio y tecnologías, así como la concientización de la importancia de estos proyectos requiere tiempo.

Complejo Ha Kishon en el área metropolitana de Haifa y utiliza un sistema de "Tratamiento de reservorios profundos – DRT"

Ubicado en el complejo Ha Kishon en el área metropolitana de Haifa, trata el agua residual procedente de 8 municipios y algunas regiones cercanas, así como de plantas industriales que en conjunto representa una población de 700.000 personas.

Una vez tratada el agua, esta es bombeada a 30 km para irrigación de cultivos no comestibles ubicados en el valle de Jezreel y el área de Haifa. El complejo Kishon es la segunda planta de tratamiento de agua residual más grande de Israel⁵⁹. El establecimiento del Complejo Kishon esencialmente permitió que la

⁵⁹ EMWIS Technical unit. 2005. Local water supply, sanitation and sewage. Recuperado de: <http://www.emwis.org/countries/fol749974/semide/PDF/Sogesid-morocco> .

mayor parte del agua dulce del National Carrier se desviara al área de Haifa para irrigación de cultivos ⁶⁰.

El complejo Ha Kishon utiliza un sistema de **“Tratamiento de reservorios profundos – DRT”**, que consiste en reservorios de estabilización (8 a 15 m de profundidad), para almacenamiento y purificación de efluentes parcialmente tratados provenientes de lagunas aeróbicas y anaeróbicas ubicadas en Haifa y Afuala (Mekorot, Israel National Water, Sin fecha) este sistema puede remover el 90% de la DBO, detergentes, 3-4 órdenes de magnitud de coliformes fecales y otros contaminantes. Allí unos 37 MMC anuales de efluentes tratados biológicamente son conducidos a los reservorios de estabilización de 12 MMC en volumen. (Quipuzco, L. Sin fecha)

Estos reservorios de estabilización son usualmente operados en modo batch secuencial, sin embargo, puede ser una desventaja ya que requieren gran área para su desarrollo. Su capacidad de almacenamiento regula entre la época de producción y los meses de verano.

Características de las aguas

Volumen de reúso de agua residual o lluvia incorporada al Proyecto

Se tratan alrededor de 37 millones de metros cúbicos por año

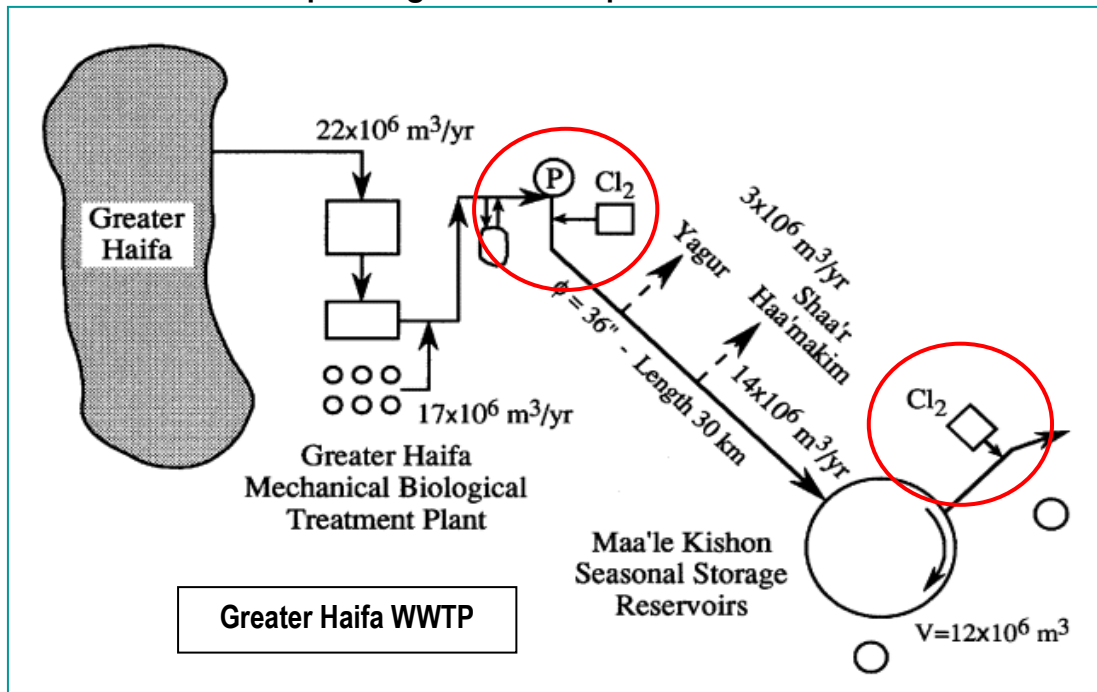
Tecnologías implementadas

Usa un sistema de **Tratamiento de reservorios profundos – DRT** para tratar el agua residual procedente del área de Haifa y Afula. Tras un tratamiento biológico, el agua es almacenada en un depósito con 60 días de tiempo de retención y desinfectada mediante cloración. Suministra agua a 570,000 HE en la zona norte del país con un efluente de calidad suficiente para irrigación sin restricciones. ⁶¹ En la siguiente imagen se puede observar un esquema general de la planta de tratamiento.

⁶⁰ Mekorot, Israel National Water. (Sin fecha). Examples of Mekorot's treatment and reclamation plants around the country. Israel. Recuperado de: <http://www.mekorot.co.il/Eng/newsite/Solutions/WastewaterReclamation/Pages/WastewaterTreatmentandReclamationTreatmentandReclamationFacilities.aspx>

⁶¹ CARTIF – División de Medio Ambiente. (Sin fecha). Analisis de las mejores practicas de tratamiento y reutilización de aguas residuales urbanas con fines agrícolas en los países del mediterraneo. Boecillo - España. Recuperado de: http://uest.ntua.gr/archive/medaware/publications/Hidalgo_100022005.ppt

Gráfico 46. Esquema general de la planta de tratamiento en Haifa.



Fuente: CARTIF – División de Medio Ambiente, sin fecha.

Usos del agua tratada: Principalmente para cultivos no comestibles ubicados en el valle de Jezreel y el área de Haifa.

Aspectos Financieros

El costo de agua se puede observar en la siguiente Tabla 33, se encuentra valorado en centavos de dólar por cada m³, donde se puede concluir que los costos por m³ del tratamiento de agua residual por el método DRT disminuye en casi la mitad en el rango estudiado.

Tabla 33. Costo de agua

| | US cents por m ³ |
|--|-----------------------------|
| Fuentes de agua convencional | 25 -30 |
| Reúso de agua residual | |
| a. Tratamiento biológico secundario | 5-15 |
| b. Tratamiento reservorio profundo (DRT) | 7-15 |
| TOTAL DRT | 12-30 |

Fuente: Quipuzco Ushñahua, L. E. (2004). Valoración de las aguas residuales en Israel como recurso agrícola: Consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol 7, N.º 13, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 64-72.

Dificultades y retos: El proyecto requiere para su desarrollo, disponibilidad de grandes áreas de tierra.

Aspectos Institucionales⁶²

Cada una de las etapas relacionadas con el tratamiento del agua residual y posterior uso en Shafdan, tiene actores institucionales y empresarios del país que se han interesado en participar en el proyecto, como se puede ver en el Gráfico 47. Cada uno con su especialidad ha implementado nuevas tecnologías para la irrigación de los cultivos, implementado nuevos métodos para la recolección y tratamiento del efluente, así como la conducción y entrega para los agricultores en sus respectivos cultivos.

Gráfico 47. Participantes del sistema de tratamiento de aguas residuales en Shafdan



Fuente: Ben Gurion University of the Negev, Sapir Academic College, Jerusalem Institute for Policy Research. (Sin fecha).

En cuanto al marco legal y las instituciones relacionadas con el sector de aguas en Israel (Fernández-Buckley, 2001), el país desde el año 1959 cuenta con la Ley de Aguas. Allí se establece el marco para el control y protección de los recursos hídricos israelíes. Dispone que el agua es un recurso productivo escaso, y debido a su escasez, debe de ser utilizada en beneficio de todo el público; toda el agua es de propiedad pública y se prohíbe a particulares llevar a cabo acciones que requieran el uso de agua sin el consentimiento de la Comisión de Aguas.

⁶² Ben Gurion University of the Negev, Sapir Academic College, Jerusalem Institute for Policy Research. (Sin fecha). Israeli water system - A Circular Economy Business Model Case. Recuperado de: <http://www.r2piproject.eu/wp-content/uploads/2019/05/Water-Case-Study.pdf>

La Ley de Aguas ha surtido diferentes modificaciones. Entre ellas, se destaca la del año 1971, donde se prohíbe la contaminación directa o indirecta del agua, así como la de 1991, donde se refuerzan las sanciones para aquellos que transgredan la Ley de Aguas. Asimismo, en esta ley se establece que las decisiones relativas a la cantidad, producción y suministro de agua son competencia de la Comisión del Agua, una institución que desde 1996 se encuentra dentro del Ministerio de Infraestructuras Nacionales.

A continuación, se mencionan los actores principales que conforman la institucionalidad de aguas en Israel⁶³:

Comisión del Agua: Es el organismo responsable de la gestión de los recursos hídricos de Israel y de asegurarle a la población un suministro estable de agua para sus diversos usos.

Es responsable de establecer las políticas hídricas, prevenir la contaminación de las fuentes de agua, el control de torrentes y prevención de inundaciones, el desarrollo de nuevas fuentes de agua, el uso de aguas residuales, la creación de plantas desalinizadoras y las campañas de promoción y concienciación sobre usos eficientes del agua.

En términos generales es quien implementa la ley de agua, sus planes, desarrollo del sector, asigna y administra el agua y, establece y revisa anualmente los precios del agua con la aprobación de un comité parlamentario especial.

El Comisario de Aguas es un funcionario nombrado por el gobierno para implementar su política hídrica. Es responsable de todo lo que ocurra y se lleve a cabo con respecto a la gestión hídrica y es la máxima autoridad en este campo. La Comisión de Aguas se divide en varios departamentos entre los que se encuentran:

- Servicio Hidrológico
- Departamento de Cuotas y Licencias
- Departamento de Desarrollo
- Departamento de Planificación
- Departamento de Calidad de Agua y Aguas Residuales
- Departamento de Conservación del Suelo y Drenajes
- Sección Económica
- Departamento Legal
- Administración y organización
- Comité de Evaluación de Infraestructuras Hidráulicas

⁶³ Fernández, D. (junio de 2001). Informe sobre la situación del mercado del agua y tecnologías relacionadas en Israel. Recuperado de: <https://docplayer.es/15134198-Informe-sobre-la-situacion-del-mercado-del-agua-y-tecnologias-relacionadas-en-israel.html>

- Consejo Científico

Administración Nacional de Aguas Residuales: Órgano encargado del tratamiento de las aguas residuales. Está compuesto por representantes de las autoridades locales y de los ministerios con competencias relevantes. Es la responsable de elaborar planes nacionales de tratamiento de aguas residuales.

Comité de Aguas: El Comité de Aguas es un organismo con 39 miembros, que asesora al Comisionado de aguas en temas relacionados con la política hídrica. Sus miembros son nombrados por el gobierno, dos tercios de estos representan al público y el tercio restante al ejecutivo.

Tribunal de Asuntos del Agua: Instancia de apelación ante el que se pueden recurrir las decisiones tomadas por el gobierno o el Comisionado de Aguas en el cumplimiento de sus funciones. Se encarga además de establecer sanciones sobre aquellos que transgredan la Ley de Aguas y demás legislación hídrica.

Mekorot: (Mekorot water company Ltd.). Es la compañía nacional de agua de Israel, produce y distribuye alrededor del 70 por ciento del suministro de agua en el país. Se encarga de operar el National Water Carrier (Acueducto Nacional de Israel), que distribuye el agua hacia el sur desde el lago de Galilea hasta el Desierto de Negev.

Opera bajo la autoridad del Ministerio de Energía y es auspiciada por la Autoridad del Agua. Fue fundada en 1937, opera como productor y proveedor de agua de conformidad con las disposiciones de la Ley del Agua, 5719-1959, opera y administra la planta nacional de agua.

La empresa suministra agua a los sectores doméstico, agrícola e industrial, al Reino de Jordania y la Autoridad Palestina, de conformidad con sus compromisos en los acuerdos políticos. Opera aproximadamente 3000 instalaciones en todo Israel en las áreas de suministro de agua, calidad del agua, infraestructuras, tratamiento de aguas residuales y desalinización, entre otros.

El sistema de suministro de agua de Mekorot unifica la mayoría de las plantas de agua regionales, la empresa nacional de transporte de agua y la planta de Yarkon-Negev, y extrae agua del mar de Galilea, acuíferos, pozos, agua de mar, agua desalinizada y agua salobre⁶⁴.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MARD): Es la autoridad competente en relación con el uso o aprovechamiento de las aguas. Tiene

⁶⁴ Ministerio de Energía de Israel. Recuperado de: https://www.gov.il/en/departments/general/mekorot_water

competencia para dictar las normas sobre cantidad, calidad, aprovechamiento, restricciones, cánones, uso eficiente del agua, entre otras⁶⁵.

Ministerio de Infraestructuras Nacional, energía y recursos de agua (MNI): Este ministerio cuenta con el Departamento de Consulta del Sector del Agua. Asesora a los encargados de la toma de decisiones en las políticas de gestión de agua y alcantarillado, a corto, mediano y largo plazo, así como también promueve las decisiones gubernamentales y las enmiendas legales necesarias a pedido. Promueve la cooperación internacional en temas de gestión del agua, desarrollo de tecnología de agua y alcantarillado, así como la integración de las capacidades israelíes en los países interesados⁶⁶.

Autoridad Gubernamental para Agua y Alcantarillado: Está a cargo de la gestión, operación, desarrollo y regulación del sector del agua de Israel. Es responsable de la conservación y rehabilitación de las fuentes de agua naturales, el desarrollo de nuevas fuentes de agua y la supervisión de los consumidores y productores de agua para proporcionar de manera eficiente servicios de agua y alcantarillado de máxima calidad y confiabilidad, manteniendo la sostenibilidad para el bienestar de Los residentes del Estado de Israel. Se fundó en 2007 con el objetivo de unificar las autoridades de gestión y supervisión en el sector de agua y alcantarillado bajo una entidad gubernamental profesional. Se encuentra vinculada al Ministerio de Energía, que está representado en el consejo de la autoridad a través del Director General Adjunto del Ministerio⁶⁷.

Ministerio de Salud (MOH): es responsable de la calidad del agua potable en Israel. A fin de garantizar la calidad del agua, el Ministerio ha promulgado regulaciones que especifican los estándares de calidad del agua en cuanto a sus aspectos microbianos, químicos, físicos y radiológicos.

Laboratorio Limnológico Yigal Allon Kinneret: (Investigación Oceanográfica y Limnológica de Israel) lleva a cabo investigaciones destinadas a comprender cómo las condiciones presentes y futuras pueden influir en la calidad del agua y monitorea los principales factores ambientales que pueden afectar el estado del lago Kinneret (Lago Tiberias).

⁶⁵ Mirassou, Susana Beatriz (2009). La gestión integral de los recursos hídricos: aportes a un desarrollo conceptual para la gobernabilidad del agua. Tesis de Doctorado. FLACSO. Sede Académica Argentina, Buenos Aires.

⁶⁶ Ministerio de Energía de Israel. Recuperado de: https://www.gov.il/he/departments/Units/water_unit

⁶⁷ Ministerio de Energía de Israel. Recuperado de: https://www.gov.il/en/departments/general/water_authority1

Aspectos Legales⁶⁸

En Israel se han unido varios factores que ha hecho necesario el reúso del agua tratada, principalmente: i) la escasez de agua, ii) el alto crecimiento de la población, iii) regulación fuerte para proteger los acuíferos y el agua potable. Esto ha generado que el 87% de los efluentes de agua residual tratada es usada, actualmente, para fines agrícolas.

A partir de 1950 se generó una conciencia en Israel para tratar las aguas residuales generada como consecuencia de los factores arriba mencionados. Esto desencadenó en un "boom" en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales sin darle, en su momento, mucha importancia al nivel de tratamiento ni a las características técnicas constructivas de las plantas (debido a que no era una prioridad para ese entonces). Con el desgaste que han tenido esas plantas construidas (67 actualmente en todo el país) por el paso del tiempo, se han generado problemas operativos y de calidad del agua tratada.

Esto hizo que Israel se haya replanteado regulatoriamente a partir de 2010, en donde "the Knesset" -Parlamento Israelí - aprobó los reglamentos del Comité Inbar para todo el país. La nueva regulación fue introducida transitoriamente entre 2010 y 2015 con el fin de dar tiempo a las partes interesadas de adaptarse a los nuevos requerimientos técnicos de tratamiento, lo cual requería optimización de las plantas existentes.

De acuerdo con lo establecido en la regulación vigente, la mayoría de las aguas residuales tratadas que van a emplearse en reúso deben someterse a un tratamiento terciario, dando cumplimiento a los parámetros de la calidad del agua en aspectos como salinidad y metales pesados. Una de las características claves de la nueva reglamentación en el reúso del agua en Israel, es que divide el país en múltiples zonas de acuerdo con las características geográficas e hidrológicas y los usos que se le dará al recurso, cada subregión está sujeta a diferentes estándares de reutilización. Excepcionalmente, se permite un nivel de tratamiento secundario para plantas que atienden poblaciones más pequeñas.

Las nuevas tecnologías, la autoridad regulatoria y el Gobierno, han jugado un rol importante para incentivar a los agricultores a usar el agua residual tratada. Esto se debe a un alto nivel de inversión del Gobierno que permite subsidiar la infraestructura requerida para almacenar y tratar el agua; y, adicionalmente, a partir de la fijación del precio del agua residual reusada que la hace mucho más atractiva en relación con adquirir agua potable.

⁶⁸ Banco Mundial. Water Management in Israel. Key Innovations and Lessons Learned for Water-Scarce Countries. Agosto 2017.

En síntesis, varios factores de orden jurídico han influido para lograr generar un reúso del agua, entre ellos, principalmente, los siguientes:

Supervisión para el adecuado uso del agua potable: Dada la escasez de agua potable, el nivel de supervisión en relación con su uso se ha incrementado, lo cual ha generado que se busquen alternativas diferentes al agua potable para usos agrícolas.

Niveles de tratamiento altos: Exigir, como regla principal, niveles de tratamiento terciarios (excepcionalmente secundarios para poblaciones menores), lo cual incrementa la calidad del agua residual permitiendo el reúso.

Regulación de la tarifa para el reúso: Generar, a través de la regulación, incentivos o medidas que hagan que el precio del agua reusada sea inferior al agua potable, volviendo atractivo este producto para potenciales compradores.

De igual forma, es posible indicar que Israel tiene una madurez normativa en materia de agua de más de cincuenta años. Cuatro son las leyes principales que regulan el agua -en términos generales-

Tabla 34. Matriz normativa de las principales leyes de Israel

| Norma | Objeto |
|---|--|
| "The Water Law" (1959) - Ley del Agua | Marco normativo sobre la protección y el control del agua como recurso natural |
| Water measurement law (1955) - Ley de medición del agua | Se estableció la medición como mecanismo para controlar la provisión de agua. |
| Law for Supervision of Water Drillings (1955) - Ley de supervisión para la perforación de pozos | Protección del acuífero para evitar que, a través de las perforaciones, se genere la salinización del agua dulce |
| Law for Drainage and Flood Prevention (1957) - Ley de drenaje y prevención de inundaciones | Dada la rápida urbanización de Israel, se expidió esta Ley para establecer mecanismo de control para la prevención de inundaciones |

En materia regulatoria, el Ministerio de Salud de Israel estableció en 2010 los requisitos para regular la calidad del efluente de las aguas tratadas y así garantizar que el reúso no afecte los usos agrícolas:

Tabla 35. Requisitos para regular la calidad del efluente de las aguas tratadas

| Norma | Objeto |
|--|------------------------------------|
| Sewage Effluents Quality Standards and | Garantizar el nivel de tratamiento |

| Norma | Objeto |
|---|---|
| Sewage Treatment Rules (2010) - Normas de calidad de efluentes de agua residuales y normas de tratamiento de aguas residuales | permitiendo que el reúso del agua tenga unas condiciones mínimas de calidad |

El marco de política establece precios favorables para dar a los agricultores un fuerte incentivo cuando en sus cultivos hacen uso de agua residual tratada en lugar de agua dulce. Las aguas residuales tienen un precio de US \$ 0.3 por metro cúbico, mientras que las tarifas de agua dulce para agricultura están en US \$ 0.66 por metro cúbico, una reducción de casi la mitad del precio inicial para agua dulce. Mekorot (empresa encargada de este sistema) puede reducir los precios debido a un subsidio entregado por el Ministerio de Hacienda con el fin de cubrir la diferencia entre costos y tarifas de suministro.

Conclusiones

- La situación que ha enfrentado Israel en cuanto al recurso hídrico, su poca disponibilidad y continuo crecimiento económico, lo ha obligado adaptarse y diseñar sistemas que le permitan lograr la seguridad de la oferta hídrica, a pesar de la extrema escasez. Por lo anterior, el país se reconoce como un líder a nivel mundial en cuanto al reúso del agua
- Los proyectos de mayor relevancia en el reúso del agua tratada están orientados fundamentalmente al Riego, siendo este uno de los objetivos en la gestión integral del agua, denominándose "Reutilización a gran escala de las aguas residuales tratadas para riego".
- El proyecto emblemático de Israel para la reutilización de efluentes con fines agrícolas ha sido la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) de Shafdan. La PTAR de Shafdan trata y reusa más de 140 MMC de agua residual por año (aproximadamente 390.000m³/día), procedentes de Tel Aviv y siete ciudades vecinas (13 municipios), para una población aproximadamente de 2,5 millones de personas.
- Los sistemas de tratamiento de aguas residuales para reúso en riego incorporaran en Shafdan lodos activados con zonas aerobias y anóxicas con el fin de obtener una remoción simultánea de nitrógeno y DQO por medio de la nitrificación y desnitrificación, Clarificadores y sistemas extensivos complementarios a base de Tratamiento de suelo acuífero (SAT), que lleva el efluente a campos de infiltración de dunas de arena de un acuífero de agua subterránea, en donde las aguas se filtran naturalmente a través de varias capas de suelo para evitar que las aguas del acuífero se contaminen y

alrededor de 400 días se extrae y lleva a irrigación. En el complejo Ha Kishon se utiliza un sistema de "Tratamiento de reservorios profundos – DRT" (reservorios de estabilización entre 8 a 15 m de profundidad), que provienen de lagunas aeróbicas y anaeróbicas ubicadas en Haifa y Afuala.

- El otorgamiento de subsidios para la inversión en reutilización del agua tratada es un factor que favorece su implementación. Igualmente, los subsidios al precio de las aguas residuales tratadas para riego incentiva a los agricultores a hacer uso de las mismas, en vez de agua dulce para el riego. Sin estos subsidios significativos o una gran inversión para lograr un buen tratamiento terciario, transportar y almacenar el agua, no es posible realizar este tipo de proyectos, puesto que como lo ha demostrado Israel, es necesario para cubrir los altos costos que se generan.
- La reutilización de aguas residuales en Israel es la única parte del ciclo que no ha logrado la recuperación del costo total a través de las tarifas.
- El trabajo conjunto entre cada uno de los actores que hacen parte del proyecto es importante, al igual que la voluntad política para regular el reúso del agua residual tratada e incentivar su aplicación en actividades agrícolas a través de la disminución en los precios.
- La Comisión del Agua es el organismo responsable de la gestión de los recursos hídricos de Israel y de asegurarle a la población un suministro estable de agua para sus diversos usos. Es responsable de establecer las políticas hídricas, prevenir la contaminación de las fuentes de agua y el uso de aguas residuales. Uno de sus departamentos se encarga de la calidad de agua y aguas residuales.
- La Administración Nacional de Aguas Residuales es la entidad encargada del tratamiento de las aguas residuales. Elabora los planes nacionales de tratamiento de estas aguas.
- El Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MARD) es la autoridad competente en relación con el uso o aprovechamiento de las aguas. Tiene competencia para dictar normas sobre cantidad, calidad, aprovechamiento, y uso eficiente del agua.
- Otras autoridades responsables de la gestión de las aguas residuales en Israel son el Comité de Aguas; el Tribunal de Asuntos del Agua; la Compañía Nacional de Agua de Israel (MEKOROT); el Ministerio de Infraestructuras

Nacional, energía y recursos de agua; la Autoridad Gubernamental para Agua y Alcantarillado y el Ministerio de Salud.

- Dada la escasez de agua potable, el nivel de supervisión en relación con su uso se ha incrementado, lo cual ha generado que se busquen alternativas diferentes al agua potable para usos agrícolas.
- Exigir, como regla principal, niveles de tratamiento terciarios (excepcionalmente secundarios para poblaciones menores), ha permitido un incremento en la calidad del agua residual, permitiendo el reúso.
- La generación, a través de la regulación, de incentivos o medidas que hagan que el precio del agua reusada sea inferior al agua potable, vuelve atractivo este producto para potenciales compradores.

3.3. Conclusiones generales

En relación a los aspectos técnicos se puede concluir:

La principal destinación de las aguas residuales regeneradas a nivel mundial es la agricultura, la cual demanda el 70% de las aguas residuales tratadas.

La utilización del agua residual para fines agrícolas se realiza directamente de los efluentes de las aguas residuales domésticas o indirectamente cuando se utilizan las fuentes de agua que son receptoras de las descargas sin tratar.

El uso de aguas residuales para agricultura se justifica no solo en la disponibilidad del recurso hídrico sino en el contenido de nutrientes que son beneficiosos para los cultivos y evitan incurrir en costos para adquirir fertilizantes.

En las directrices definidas en el año 2006 por parte de la OMS para el uso seguro de las aguas residuales, donde se aplican enfoques de gestión de riesgos según el Marco de Estocolmo y se recomienda definir objetivos sanitarios realistas, además de evaluar y administrar los riesgos, se establecen varias medidas posibles de protección de la salud (barreras), que incluyen el tratamiento de desechos, restricción de cultivos, adaptación de técnicas de riego y tiempo de aplicación y control de la exposición humana.

A pesar de existir estas directrices y de recomendaciones de la FAO para el uso de las aguas residuales tratadas y su grado de tratamiento para uso agrícola, éste está más asociado a aspectos económicos, tarifas y concepciones culturales.

Por ejemplo, en el caso de Israel, los cultivadores no reciben las aguas residuales domésticas tratadas en las ciudades si no cumplen con las regulaciones establecidas para su reúso. Esto, por los riesgos para sus cultivos cuyos productos serán exportados y vendidos en el mercado internacional y están sujetos al cumplimiento de estándares que les permite su mercadeo. Por el contrario, en Latinoamérica donde se han implementado sistemas de reúso con agua residual regenerada, los cultivadores aun reclaman que las mismas les sean entregadas con todos "los nutrientes" que lleva el agua residual, dado que el tratamiento de las aguas residuales conlleva la eliminación de los nutrientes -nitrógeno y fósforo (para cumplir con los estándares establecidos para su reúso), lo que implica mayores costos en sus cultivos al tener que utilizar fertilizantes, lo que les sube su costo de producción.

En países como Israel, se cuenta con amplia experiencia en el uso de tecnologías de tratamiento que permiten cumplir con altos estándares de calidad y están operando desde hace varias décadas. Igualmente adelantan programas

de investigación que el Estado patrocina no solo en tratamiento de las aguas sino también en seguridad del agua y sistemas de riego, que permiten periódicamente ofrecer mejoras tecnológicas, que pueden ser incorporadas cada vez más en sus procesos de tratamiento y riesgo.

El otorgamiento de subsidios para la inversión en reutilización del agua tratada es un factor que favorece su implementación. Igualmente, los subsidios al precio de las aguas residuales tratadas para riego incentiva a los agricultores a hacer uso de las mismas, en vez de agua dulce para el riego.

El agua residual regenerada para reuso doméstico tiene mayor probabilidad de ser adoptada, en la medida que los indicadores de escasez del recurso hídrico sean mayores y que están asociados, como en algunas zonas (en especial de África) a la poca capacidad de pago de las tarifas de tratamiento de las comunidades y la deficiente capacidad administrativa de los municipios. que deben optar por su uso después de incorporar procesos que den mayor seguridad a la calidad del agua, de la que pueden tener disponible en sus regiones, por otras fuentes que puedan ser usadas para consumo

En América, con excepción de Estados Unidos que cuenta con una capacidad adquisitiva más alta para incorporar tecnología de punta para el tratamiento de las aguas con seguridad, no parecen tener dentro de sus prioridades el uso de agua residual para consumo humano ya que solamente consideran usos de riego de jardines, aseos y otros domésticos que no impliquen este uso. Es de anotar que aún en Estados Unidos en algunos Estados que sufren escasez de agua y que tienen capacidad de incorporar esta tecnología para asegurar la calidad para consumo humano, no han podido superar la barrera cultural que implica saber que el agua que está siendo descargada al alcantarillado puede volver a ser consumida nuevamente después de tratada.

El agua residual regenerada para uso industrial tiene mayor potencial de aplicación (en especial de minería), ya que los estándares y controles de calidad que incorporan en sus procesos favorecen su uso. El agua residual doméstica generada en ciudades de alta población y relativa cercanía que les permitan mantener y crecer su productividad, en especial en zonas de baja oferta hídrica, es más atractiva que otras alternativas como desalinización o extracción y tratamiento de agua subterránea.

En cuanto a las aguas lluvias, su aplicación puede estar más enfocada hacia pequeñas poblaciones y comunidades en zonas donde se presenten altos niveles de precipitación. Existen soluciones tecnológicas que permiten que el agua sea interceptada y transportada a embalses o galerías subterráneas de recarga, para su posterior uso en especial agrícola y de consumo.

En relación con los aspectos institucionales, es posible concluir de las experiencias internacionales lo siguiente:

La totalidad de los países analizados dentro de las experiencias internacionales presentan arreglos institucionales del poder ejecutivo en el sector de agua y saneamiento similares a Colombia. Esto es, el gobierno central es quien define las políticas sectoriales, su ejecución se encuentra descentralizada y coordinada a nivel regional y municipal, donde se definen competencias, funciones y facultades desarrolladas por diferentes entidades para el cumplimiento de las políticas sectoriales.

A diferencia de Colombia, donde el sector de agua potable y saneamiento básico se encuentra en cabeza de un viceministerio (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico) que forma parte de un ministerio que se ocupa de otro sector (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio), los países analizados en las experiencias internacionales cuentan con un organismo central, rector, autónomo con funciones exclusivas para el desarrollo y la gestión del recurso hídrico a saber: México: CONAGUA, Chile: Dirección General de Aguas, Perú: Autoridad Nacional del Agua, Sudáfrica: Ministerio de Agua y Saneamiento e Israel: Comisión del Agua.

En relación con los aspectos jurídicos, es posible concluir de las experiencias internacionales lo siguiente:

Los países con escaso recurso hídrico o con estrés hídrico en su oferta, han tenido que avanzar obligatoriamente hacia la regulación del reúso del agua como una alternativa para proveer agua en ciertas actividades (p.ej. agrícola, industrial e incluso, consumo humano) y, como consecuencia, han desarrollado una serie de instrumentos legales para generar las reglas necesarias para promover y controlar esta actividad.

Los avances jurídicos sobre la materia en las experiencias internacionales, han llevado a los distintos países a regular aspectos como: (i) la calidad del efluente, obligando a hacer tratamientos que mejoren el agua haciendo de esta apta para el reúso, (ii) los permisos y condiciones necesarias para prestar la actividad, (iii) la posibilidad de concebir esta actividad como susceptible de recibir vinculación de capital privado, como el caso de las asociaciones público - privadas (Ley 1508 de 2012) en Colombia.

La alineación y coordinación interinstitucional de las autoridades y entidades competentes del sector facilitan el diseño de políticas a largo plazo que incluyan el reúso de agua. La inclusión de funciones concretas sobre la aplicación, promoción, etc. del reúso en las normas que rigen a las entidades evita que se “olvide” o se deje vacante la posición de director y ejecutor de la política de reúso.

Países como Sudáfrica han ido introduciendo agua reusada incluso para el consumo humano (v.gr. en el caso de Sudáfrica el agua se combina con el agua potable sin embargo no hay evidencia de usar el agua reusada para el uso humano de manera directa, como sí ocurre en Namibia). Sin embargo, es necesario trabajar en la percepción de la comunidad para que se entienda que el agua reusada con un adecuado tratamiento puede ser ingerida por el ser humano.

Como ocurre en la experiencia chilena, es importante pensar y diseñar nuevos mecanismos o estrategias que tengan la potencialidad de promover el reúso. La distinción normativa entre aguas negras y aguas grises puede tener efectos positivos, por lo que las autoridades deben estar abiertas a discutir e implementar cambios de esta naturaleza.

Hay países en los que todavía existe controversia sobre la propiedad del agua residual (p.ej. Chile), haciendo de este un aspecto necesario a ser regulado para evitar futuras controversias. El regulador y el director de la política debe trabajar diligentemente en la solución de esta clase de controversias o en la expedición de nueva regulación que se necesite para hacer operativas las estrategias, pues las demoras afectan la seguridad jurídica de los actores relevantes y usuarios.

Además de la regulación de aplicación forzosa sobre el reúso de agua, es importante considerar otra clase de estrategias de participación voluntaria para la reducción del consumo y el reúso aplicando beneficios reputacionales e incentivos de distintos tipos, como lo es el Certificado Azul en Perú y sus beneficios asociados. La regulación clara y adecuada sobre este aspecto puede ser el primer paso para la promoción del tratamiento y el reúso en entornos industriales y empresariales, donde los países latinoamericanos presentan el mayor rezago.

4. TÉCNICAS DE REÚSO IMPLEMENTABLES EN COLOMBIA

El presente capítulo corresponde al tercer entregable “Documento con las técnicas de reúso doméstico, industrial, drenaje agrícola y uso de aguas lluvias implementables en Colombia” el cual, de acuerdo con los pliegos de condiciones, presenta las técnicas de reúso implementables en Colombia.

Se documentan las técnicas de tratamiento para el reúso, que, si bien consideran lo establecido en la normatividad nacional vigente, también tienen en cuenta otras normativas (FAO; WHO) que pueden potenciar el reúso, en especial para el sector agrícola.

Se referenciarán entre muchas alternativas, tecnologías de aplicación en el país, dado que existen tratamientos desarrollados que se pueden completar y permiten entregar agua con calidad para su reúso en las diferentes alternativas establecidas.

En el caso de aguas lluvias, se indicarán aquellas tecnologías utilizadas para la captación y aprovechamiento, algunas de las cuales han sido referenciadas en el informe anterior. El agua lluvia se constituye en una alternativa de fuente de abastecimiento de agua en aquellas regiones que tienen una condición particular de disponibilidad de este recurso y enfrentan dificultades para acceder a agua potable para el desarrollo de actividades productivas y para el consumo humano.

Las técnicas estarán referidas exclusivamente al tratamiento del agua residual desde que entra a una PTAR, hasta el punto de salida para ser reusada. Se hace esta precisión, teniendo en cuenta que en general los proyectos, además de la PTAR, incorporan obras adicionales o de saneamiento para transportar las aguas residuales hasta el sitio de tratamiento o para llevarlas una vez tratadas hasta el sitio donde se realizará su reúso y aprovechamiento.

4.1. Técnicas de tratamiento para el reúso

4.1.1. Reúso agrícola

En el “Modelo para la Gestión del Reúso de Agua Residual Doméstica en la Agricultura de La Región Andina Colombiana” presentado como Propuesta de Investigación Doctoral por la Ingeniera María Fernanda Jaramillo a la Universidad del Valle con Dirección y Asesoría de los Profesionales Inés Restrepo T y Alberto Galvis C., del Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico- CINARA de la misma Universidad se señala que:

“Los criterios de calidad para el uso de las aguas residuales en riego agrícola son diferentes en países desarrollados y en vía de desarrollo.

Esta diferencia radica en las políticas y normativas de cada región y en sus avances tecnológicos y científicos. Sin embargo, el desarrollo de lineamientos de organizaciones internacionales como la WHO, FAO y EPA son los principales referentes que soportan la calidad requerida para reuso agrícola a nivel mundial. Dichos referentes están fundamentados en la recopilación de experiencias a nivel internacional e investigaciones científicas relacionadas con los riesgos en la salud humana y el ambiente que pueden estar presentes al usar el agua residual en la agricultura. La mayoría de las directrices legales propuestas en los diferentes países son soportadas en estos referentes internacionales”.

En la Tabla 36, se presentan, como referente, los criterios de calidad para el reuso de las aguas residuales en agricultura, desarrollados por diferentes países, entre los que, para efectos de nuestro estudio, destacaremos los establecidos por la EPA (2012), Organización Mundial de la Salud WHO (2006) y los definidos por la FAO (Tabla 37) que han sido también referidos en el citado Estudio y en Journal de Sustainability -MDPI⁶⁹. Otros referentes utilizados como indicadores universales y nacionales para evaluar la calidad del agua residual tratada para el reuso en riego son los señalados por la FAO (Ayers & Wescott, 1985) ⁷⁰.

Como se observa en la Tabla 38, las aguas de riego se han clasificado con base al grado de restricción de uso, que emplea como criterios de calidad la salinidad (CE), la sodicidad (Combinación de RAS y CE) y la toxicidad iónica específica.

En la Tabla 39. Concentraciones máximas de elementos trazas en aguas de riego., se observan los criterios que se deben monitorear, dados los problemas de toxicidad que pueden tener ciertos componentes (iones) en el suelo o en el agua. Esta condición debe ser considerada ya que, si estos componentes se acumulan en concentraciones suficientemente altas, pueden causar daños en la morfología de las plantas, crecimiento desigual del cultivo, reducción en su rendimiento y en el peor de los casos produce la muerte de las plantas.

⁶⁹ Jaramillo Ma Fernanda, Restrepo Inés. Review. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and benefits. October 2017. -Sustainability. MDPI

⁷⁰ R.S. Ayers, D.W. Westcott. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage. Paper29 Rev. 1. 1985. <http://www.fao.org/3/T0234E/T0234E01.htm#tab1>

Tabla 36. Criterios de calidad de agua para reúso agrícola en diferentes regiones

| País (Año) | Tipo de riego | pH | CE (µS/cm) | RAS | Turbiedad UNT | SS | DBO | DQO | NT | N-NO ₃ | P | Sulfatos | CF | E. coli | Huevos de nemátodos (no./L) |
|---------------------------|---------------|---------|------------|-----|---------------|--------|---------|-----|----|-------------------|----|------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| | | | | | | (mg/L) | | | | | | CFU/100 mL | | | |
| EPA (2012) [1] | NR | 6-9 | | | 2 | 30 | 10 | | | | | | Ausente | | |
| | R | 6-9 | | | | | 10 | | | | | | 2X10 ² | | |
| WHO (2006) [2] | NR | | | | | | | | | | | | | 10 ³ | ≤1 |
| | R | | | | | | | | | | | | | | ≤1 |
| California (1978) [1] | | 6-9 | | | 2 | | | | | | | | 2X10 ² | | |
| Italia (2003) [3] | | 6-9,5 | 3000 | 10 | | 10 | 20 | 100 | 15 | | 2 | 500 | | 10 ² | |
| Francia (2010) [4] | NR | | | | | 15 | | 60 | | | | | 4Log | 2,5X10 ² | |
| | R | | | | | | | | | | | | 2-3Log | 10 ⁴ -10 ⁵ | |
| España (2007) [5] | NR | | | | 10 | 20 | | | | | | | | 10 ² | 0,1 |
| | R | | | | | 35 | | | | | | | | 2X10 ³ -10 ⁴ | 0,1 |
| Portugal (2006) [6] | NR | 6,5-8,4 | 1000 | 8 | | 60 | | | | 50 | | 575 | 10 ² | | |
| | R | 6,5-8,4 | 1000 | 8 | | 60 | | | | 50 | | 575 | 2X10 ² -10 ⁴ | | |
| Australia (2000) [7] | NR | 6,5-8,5 | | | 2 | | | | | | | | | | |
| | R | 6,5-8,5 | | | | | | | | | | | | 10 ² -10 ⁴ | |
| Israel (1999) [8] | | | | | 5 | 10 | 20 | | | | | | 10 | | |
| Túnez (1989) [9] | | 6,5-8,5 | 7000 | | | 30 | 30 | 90 | | | | | | | ≤1 |
| Jordán (2002) [9] | NR | 6-9 | | 9 | 10 | 50 | 30 | 100 | 45 | 30 | 30 | 500 | | 10 ² * | <1 |
| | R | 6-9 | | 9 | | 150 | 200-300 | 500 | 70 | 45 | 30 | 500 | | 10 ³ * | <1 |
| Kuwait (2001) [9] | | 6,5-8,5 | | | | 15 | 200 | 100 | 35 | | 30 | 0,1 | 20 | | <1 |
| Omán (1993) [9] | NR | 6-9 | 2000 | 10 | | 15 | 15 | 150 | | 50 | 30 | 400 | 2X10 ² | | <1 |
| | R | 6-9 | 2700 | 10 | | 30 | 20 | 200 | | 50 | 30 | 400 | 10 ³ | | <1 |
| Arabia Saudita (2000) [9] | NR | 6,0-8,5 | | | 5 | 10 | 10 | | | 10 | | 600 | | | |
| | R | | | | | 40 | 40 | | | | | | | | |
| China (2007) [10] | NR | 5,5-8,5 | | | | 60 | 40 | | | | | | 2X10 ² | | |
| | R | 5,5-8,5 | | | | 80-100 | 60-100 | | | | | | 4X10 ⁴ | | |
| México (1987) [11] | NR | | | | | 20 | 20 | | | | | | 240 * | | |
| | R | | | | | 30 | 30 | | | | | | 10 ³ * | | |
| Colombia (2014) [12] | R* | 6-9 | 1500 | *** | | | | | | 5 | | 500 | 10 ⁴ * | | 1 |

NR: No Restringido; R: Restringido; CE: Conductividad Eléctrica; RAS: Relación de adsorción sodio; UNT: Unidad Nefelométrica de Turbiedad; SS: Sólidos Suspendidos; DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno; DQO: Demanda Química de Oxígeno; NT: Nitrógeno Total; CF: Coliformes Fecales; * NMP/100mL. ** No se permite reúso No Restringido. *** Sujeto de análisis por parte de las autoridades ambientales considerando las condiciones iniciales del suelo a irrigar

Fuentes: 1. EPA y USAID (2012) 2. WHO (2006b) 3. Ministro della Salute (2003) 4. Ministerio de Salud y Deportes et al. (2010) 5. Ministerio del Medio Ambiente de Agricultura y de Alimentación (2007) 6. Marecos do Monte (2007) 7. Natural Resource Management Ministerial Council et al. (2016) 8. Arlosoroff (2007) 9. WHO (2006a) 10. Yi et al. (2011) 11. Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (1996) 12. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014)

Tabla 37. Guías sugeridas por la FAO para las aguas tratadas en el reúso agrícola y su tratamiento

| Tipo de reúso agrícola | Tratamiento | Calidad |
|--|---|--|
| Reúso agrícola en cultivos que se consumen y no se procesan comercialmente | Secundario Filtración - Desinfección | pH = 6,5 – 8,4 DBO < 10 mg/L < 2 UNT < 14 NMP Coli Fecal/100mL < 1 Huevo/L |
| Reúso agrícola en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente | Secundario - Desinfección | pH = 6,5 – 8,4 DBO < 30 mg/L SS < 30 mg /L < 200 NMP Coli Fecal/100 mL |
| Reúso agrícola en cultivos que no se consumen | Secundario - Desinfección | pH = 6,5 – 8,4 DBO < 30 mg/L SS < 30 mg/L < 200 NMP Coli Fecal/100 mL |

Fuente: FAO (1999).

Tabla 38. Guía para la interpretación de agua de Riego

| Problema Potencial | Unidades | Grado de restricción de uso | | |
|---|----------|-----------------------------|-------------------|--------|
| | | Ninguna | Ligera o moderada | Severo |
| Salinidad ¹ (Afecta disponibilidad de agua para el cultivo) | | | | |
| Conductividad Eléctrica | Ds /m | <0,7 | 0,7 - 3,0 | >3,0 |
| STD o SST | mg/l | <450 | 450 - 2000 | >2000 |
| Infiltración ² (reduce la infiltración; evaluar usando a la vez EC y relación adsorción de sodio RAS) | | | | |
| RAS = 0-3 y EC _w = | | >0,7 | 0,7 - 0,2 | <0,2 |
| 3 - 6 | | >1,2 | 1,2 - 0,3 | <0,3 |
| 6 - 12 | | >1,9 | 1,9 - 0,5 | <0,5 |
| 12 - 20 | | >2,9 | 2,9 - 1,3 | <1,3 |
| 20 - 40 | | >5,0 | 5,0 - 2,9 | <2,9 |
| Toxicidad de iones específicos (afecta cultivos sensibles) | | | | |
| Sodio (Na) ³ | | | | |
| Riego por superficie | RAS | <3 | 3 - 9 | >9 |
| Riego por aspersión | me/l | <3 | <3 | --- |
| Cloro (Cl) ³ | | | | |
| Riego por superficie | me/l | <4 | 4 - 10 | >10 |
| Riego por aspersión | me/l | <3 | <3 | --- |

| Problema Potencial | Unidades | Grado de restricción de uso | | |
|--|----------|-----------------------------|------------------------|--------|
| | | Ninguna | Ligera o moderada | Severo |
| Boro (B) ⁴ | mg/l | <0,7 | 0,7 - 3,0 | >3,0 |
| Elementos traza | | | | |
| Varios (afecta cultivos sensibles) | | | | |
| Nitrógeno (NO ₃ - N) ⁵ | mg/l | <5 | 5 - 30 | >30 |
| Bicarbonato (HCO ₃) (aspersión foliar únicamente) | me/l | <1,5 | 1,5 - 8,5 | >8,5 |
| pH | | | Rango normal 6,5 - 8,4 | |

¹ EC_w significado de conductividad eléctrica, como una medida de salinidad del agua reportada en deciSiemens por metro a 25°C (dS/m). STD total de sólidos disueltos, reportado en mg/l. 1Ds/m = 640 mg/l.

² RAS relación de adsorción de sodio. Determinado como RAS. La tasa de infiltración aumenta cuando aumenta la salinidad del agua aumenta.

³ Para la irrigación de superficie, la mayoría de cultivos de árboles y plantas boscosas son sensibles de sodio y al cloruro, usar los valores indicados. La mayoría de los cultivos anuales no son sensibles, usar la tabla de tolerancia a la salinidad en la FAO 1985.

⁵ Hay una tabla específica de tolerancia en la FAO 1985

⁵ NO₃ - N representa nitrógeno de nitrato, reportado en términos de nitrógeno elemental (NH₄ - N y orgánico - N deben ser incluidos cuando el agua residual está siendo evaluada).

Fuente: Ayers, R., & Wescott, D. (1985). Water quality for agriculture. Roma: FAO Irrigation and drainage paper - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO.

Tabla 39. Concentraciones máximas de elementos trazas en aguas de riego.

| Elemento | Concentración máxima recomendada* (mg/l) |
|----------------|--|
| Al (Aluminio) | 5.0 |
| As (Arsénico) | 0.10 |
| Be (Berilio) | 0.10 |
| Cd (Cadmio) | 0.01 |
| Co (Cobalto) | 0.05 |
| Cr (Cromo) | 0.10 |
| Cu (Cobre) | 0.20 |
| F (Fluoruro) | 1.0 |
| Fe (Hierro) | 5.0 |
| Li (Litio) | 2.5 |
| Mn (Manganeso) | 0.20 |
| Mo (Molibdeno) | 0.01 |
| Ni (Níquel) | 0.20 |
| Pb (Plomo) | 5.0 |
| Se (Selenio) | 0.02 |
| V (Vanadio) | 0.10 |
| Zn (Zinc) | 2.0 |

Fuente: Ayers, R., & Wescott, D. (1985). Water quality for agriculture. Roma: FAO Irrigation and drainage Paper - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO.

Con base en los criterios establecidos en los cuadros anteriores, en los parámetros establecidos en la Resolución 1207 de 2014 y la información obtenida de la revisión de experiencias internacionales, se definirán los componentes mínimos que deben tener los sistemas de tratamiento las aguas residuales para el reúso agrícola en el país.

Vale la pena mencionar que las técnicas a implementar para el reúso de agua para el sector agrícola dependen del tipo de cultivo en el que la misma va a ser usada. De esta manera, las técnicas tendrán más componentes si se pretende realizar el reúso en cultivos que son de consumo directo, es decir sin que sus productos tengan un proceso industrial, en comparación con los que tienen proceso industrial para consumo o los que no son para consumo y cumplen con otra finalidad.

De manera general, los tratamientos utilizados son normalmente sistemas convencionales que pueden incorporar, dependiendo de la destinación de las aguas tratadas para los diferentes cultivos, unidades complementarias que faciliten entregar las calidades requeridas de acuerdo con las normas particulares que regulan su utilización.

Una planta convencional combina procesos físicos y biológicos para remover la materia orgánica. Entre estos se pueden distinguir los lodos activados y filtros biológicos para el tratamiento de las aguas residuales domésticas que son las que regularmente se utilizan para riego una vez que han sido tratadas.

En los países de clima tropical, debido a que las temperaturas medias son más elevadas que las de climas templados, los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales pueden ser más económicos, debido a que los microorganismos se desarrollan con mayor rapidez; en estos casos comúnmente se implementan métodos de tratamiento como las lagunas de estabilización, lagunas aireadas, reactores anaerobios y humedales, entre otros. Estos procesos son mucho más económicos que los lodos activados o los filtros biológicos, sin embargo, requieren que se cuente con el terreno para su implementación.

A continuación, se describen dos técnicas principales de reúso que pueden ser implementables en Colombia.

4.1.1.1. Plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas biológicos a base de lagunas⁷¹

Estos sistemas son de los más económicos y eficaces en los países de clima tropical. Su ventaja, entre muchos otros, radica en que es un proceso muy eficiente en la reducción de microorganismos patógenos y huevos de nematodos intestinales.

Entre muchos estudios realizados a nivel internacional, se trae como ejemplo los procesos desarrollados al Noreste de Brasil en la ciudad de Campina Grande, Paraíba, donde se utilizan las lagunas de estabilización que reducen considerablemente los valores del DBO₅, de los coliformes fecales y se logra la eliminación de huevos de helmintos en el efluente final, según los criterios de la WHO. La Tabla 40 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 40. Resultados lagunas de estabilización

| Muestra | Tiempo de detección en días | DBO ₅ /l | Sólidos suspendidos mg/l | Coliformes fecales (por litro) | Huevos de nematodos intestinales |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Aguas residuales sin tratar | | 40 | 305 | 4,6 x 10 ⁷ | 804 |
| Efluente procedente de: | | | | | |
| Estanque anaerobio | 6,8 | 3 | 56 | 2,9 x 10 ⁶ | 29 |
| Estanque Facultativo. | 5,5 | 5 | 74 | 3,2 x 10 ⁵ | 1 |
| Estanque Maduración 1 | 5,5 | 5 | 61 | 2,4 x 10 ⁴ | 0 |
| Estanque Maduración 2 | 5,5 | 9 | 43 | 450 | 0 |
| Estanque Maduración 3 | 5,8 | 7 | 45 | 30 | 0 |

Fuente Sergio Rolim Mendoça- Lagunas de Estabilización. Mc. Graw Hill Pág. 246

Otra experiencia que se referencia es la desarrollada en la provincia de Mendoza Argentina, en donde desde hace varias décadas, por la creciente demanda de agua para uso doméstico e industrial se limitó la disponibilidad de este recurso en la agricultura. Por esa razón, se inició el tratamiento de efluentes urbanos y su reutilización en agricultura, lo cual permite que actualmente se disponga de suficiente caudal de agua residual tratada para el riego de unas 15 000 hectáreas (FAO, 2017) de vid, hortalizas, forrajes y otros cultivos.

⁷¹ Los aspectos relacionados con lagunas han sido tomados de experiencias locales, especialmente de sistemas implementadas con éxito en varios de los municipios como Ginebra y Cerrito en el Valle del Cauca; de estudios e investigaciones adelantados por CINARA y la Universidad del Valle, además de lo documentado por el Ingeniero Sergio Rolim Mendoça, en su libro Sistemas de Lagunas de Estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. Mc. Graw Hill - Acodal. 2000

El sistema de tratamiento funciona con un conjunto de lagunas anaerobias, facultativas y de maduración. Cuenta con legislación propia en cuanto a directrices sobre cultivos restringidos, medidas complementarios como elementos de protección personal de los trabajadores y medidas de alerta y educación ambiental. Tiene prohibido totalmente el riego con aguas cloacales de cultivos de consumo en fresco que se cosechan y distribuyen en forma inmediata y que tienen contacto directo con el agua de riego.

En Colombia se lleva a cabo el reúso de agua residual tratada proveniente de lagunas facultativas para el riego de cultivos, cuya calidad no siempre está acorde con lo establecido en la normatividad vigente. En el anexo 2 se presenta una relación de algunos de estos casos y resultados encontrados. Sin embargo, dado que puede ser la única alternativa de fuente de suministro de agua para el sector agrícola en los casos en que hay escasez o competencia por el recurso hídrico, es necesario analizar el potencial de mejora existe un potencial de mejora para hacer riego, de forma autorizada, una vez se cumplan con las condiciones que regulan su utilización.

La Universidad del Valle, el Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico - CINARA y estudiantes de pregrado, postgrado y doctorado, han llevado a cabo estudios e investigaciones respecto al reúso de efluentes de lagunas de estabilización y plantas de tratamiento de aguas residuales de efluentes domésticos municipales de algunos municipios del Valle de Cauca para el riego de la caña de azúcar. Los resultados han mostrado el potencial de las aguas residuales tratadas como recurso de agua disponible y fuente de suministro de nutrientes, pues generan ahorros importantes en comparación con los gastos en que actualmente se incurre por la explotación y uso de agua desde pozos y el pago por la descarga del vertimiento tratado a los cuerpos del agua. Esto teniendo en cuenta, además, el costo de implementar unidades complementarias que permitan cumplir los niveles recomendados por la FAO y la WHO, y la misma Resolución 1207 de 2014 del MADS, para el reúso agrícola.

En el Valle del Cauca, se cuenta con una experiencia de reúso de aguas residuales para el riego de cultivos de caña. Los efluentes de los municipios de El Cerrito y de Ginebra Valle son tratados en lagunas anaerobias y lagunas facultativas para un caso y filtro anaerobio de alta tasa y laguna facultativa en el otro caso, que posteriormente son utilizadas para el riego de caña en terrenos aledaños al sistema de tratamiento (Trochez Balcázar, 2017). Esta práctica económicamente puede representar una ventaja competitiva frente al uso de aguas subterráneas que son explotadas actualmente como fuente para el riego.

En el anexo 3 se presenta una relación de algunos de estos casos y resultados encontrados.

Las tecnologías con lagunas que se usan para el tratamiento de las aguas residuales que posteriormente van a ser reusadas tienen los mismos componentes de una planta de tratamiento de aguas residuales convencional. Estos son:

- Unidades de Tratamiento Preliminar (Pretratamiento)
- Unidades de Tratamiento Secundario.

Unidades de tratamiento preliminar (Pretratamiento)

Corresponde básicamente a tratamientos físicos o mecánicos, una vez las aguas residuales entran a la PTAR, estas unidades permiten retirar del efluente los sólidos gruesos, flotantes, arenas, grasas y aceites, con el fin de separar del agua la mayor cantidad posible de esos materiales, que, por su naturaleza y tamaño, crearían problemas en los tratamientos posteriores.

Entre las principales unidades se distinguen:

Rejas y Tamices^{72 73}

Son unidades de limpieza manual o mecánica para retro de flotantes y sólidos gruesos (50 a 100 mm) y finos (3 a 10 mm).

Las manuales generalmente se utilizan en las estaciones de bombeo antes de las bombas como medida de protección para evitar daños de las mismas.

Las de limpieza mecánica son utilizadas cuando existen caudales más grandes y continuos que permitirán disminuir el trabajo manual de limpieza de las rejas y disminuir los reboses y desbordamientos por el atascamiento de las rejas.

Estas unidades pueden disminuir entre un 5% y un 15% de la materia suspendida. Generalmente se instalan 2 o más unidades de forma tal que una de ellas pueda estar fuera de servicio por razones de mantenimiento. Es conveniente que existan compuertas antes de y después de cada reja de forma tal que la unidad pueda ser puesta en seco para realizar el mantenimiento, reparación o sustitución, entre otros.

⁷² Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, pág. 344.

⁷³ Desarrollado con base en el Manual técnico del agua- Degremont. 4ª edición. Pág 113 a 133

El Gráfico 48 muestra un ejemplo del detalle de estas unidades

Gráfico 48. Reja de malla gruesa y tamiz fino



Fuente: PTAR Municipio de Chiquinquirá y PTAR Funza

Desarenadores^{74 75}

Dado que los efluentes que llegan a la PTAR, especialmente los de origen municipal pueden arrastrar arenas durante las precipitaciones con el escurrimiento de las aguas lluvias, se deben instalar desarenadores. Su misión es separar arenas, término que engloba a las arenas propiamente dichas y a la grava, y cualquier otra materia pesada que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior a las de los sólidos orgánicos o putrescibles del agua residual.

Los desarenadores deberán proteger los equipos mecánicos móviles de la abrasión y desgaste anormales, reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos y la frecuencia de limpieza de los digestores o sistemas de tratamiento biológico, que se debe realizar como resultado de las excesivas acumulaciones de arenas en tales unidades.

Generalmente y por costos, para no realizar los trabajos de limpieza y mantenimiento a profundidad, se ubican estas unidades después del bombeo, aunque ello implique mayor mantenimiento a las bombas.

⁷⁴ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, pág. 353.

⁷⁵ Desarrollado con base en el Manual técnico del agua- Degremont. 4ª edición. Pag121

El Gráfico 49 muestra un detalle de este tipo de unidades

Gráfico 49. Desarenadores



Fuente: PTAR Municipio de Chiquinquirá y PTAR Municipio El Cerrito

Este sistema regularmente se maneja a caudal constante equipado con un sistema de aforo tipo vertedero o canaleta Parshall.

Desengrasado – Separadores de Grasa

Es un depósito dispuesto para lograr que la materia flotante liviana ascienda hasta la superficie y se pueda retirar y tratar, mientras que el líquido salga de forma continua del tanque.

Su instalación puede o no realizarse con el sistema de lagunas, según la concentración de grasas y aceites que puedan tener las aguas residuales domésticas provenientes del sector industrial y de servicios, dependiendo de si el generador las retira antes de verterlas al sistema.

Estas unidades pueden estar combinadas con los desarenadores en equipos mecánicos y aireados, cuando los volúmenes de grasas no son tan altos en cuyo caso es mejor construirlos por separado. El Gráfico 50 muestra un sistema de desengrasado.

Gráfico 50. Desengrasado aguas residuales domésticas y sistema combinado desarenado/desengrasado



Fuentes: <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>, <https://calafgrup.com/es/pc/79-desarenament-i-desgreixatge>

Unidades de tratamiento secundario

El tratamiento secundario se destina básicamente a la degradación biológica de compuestos carbonáceos y su función es la descomposición de carbohidratos, proteínas, grasas y aceites a compuesto más simples como CO_2 , H_2O , NH_3 , CH_4 y H_2S , entre otros, dependiendo del proceso que predomine.

Cuando se trabaja con lagunas de estabilización generalmente no es necesario implementar un sistema de tratamiento primario para la remoción de sólidos sedimentables y suspendidos, ya que, por su gran capacidad amortiguadora y altos tiempos de detención hidráulica, las aguas residuales después del tratamiento preliminar pueden ingresar directamente a las lagunas y recibir las cargas de sólidos y los excedentes de grasas que no son retenidos en las unidades preliminares.

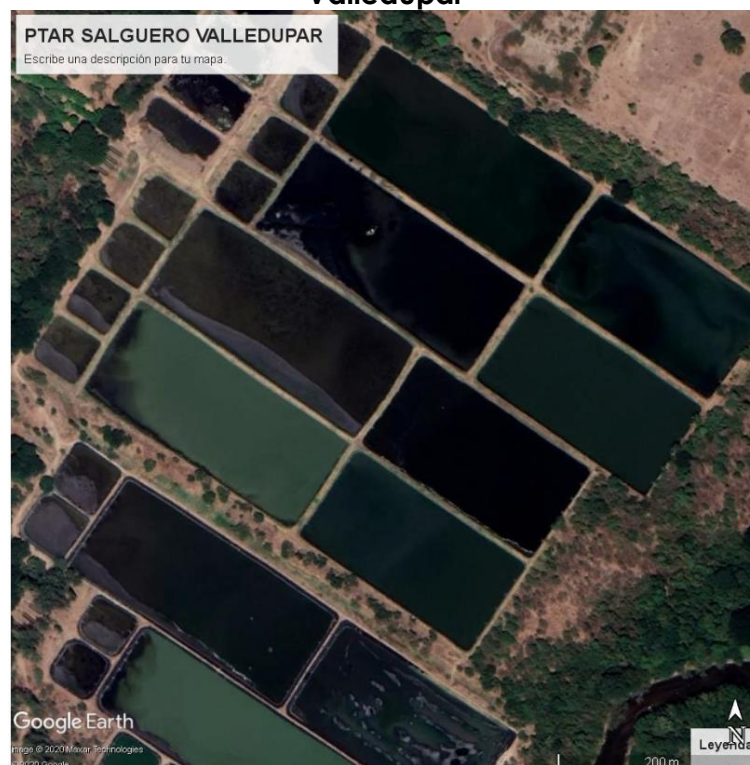
De las experiencias a nivel nacional e internacional que han sido revisadas, los arreglos de lagunas de estabilización basados en sistemas anaerobios, seguidos de lagunas facultativas y posteriormente de lagunas de maduración son el esquema que puede garantizar los mejores resultados en cuanto a remoción de material orgánica y calidad microbiológica, que puede ser complementado con un tratamiento terciario de desinfección para asegurar la calidad del efluente para reúso agrícola.

Para el caso de utilización de lagunas de estabilización generalmente no es necesario implementar un sistema primario para remoción de sólidos sedimentables y suspendidos, considerando que, dado los largos tiempos de

retención de las lagunas, tales sólidos pueden ingresar y ser tratados en las lagunas directamente a tratamiento secundario para su degradación.

Los sistemas de lagunas de estabilización en serie (Ver Gráfico 51), con tiempos de detención entre 5 y 8 días en cada una de las unidades, producen un efluente de excelente calidad microbiológica (WHO, 1989). Mendoza señala en su libro (Mendoza, 2000) que generalmente, esa serie de lagunas en configuración de una primera laguna anaerobia, seguida de una facultativa y dos o más de maduración permiten que en las dos primeras ocurra la reducción de la DBO_5 (60%) en promedio y de bacterias indicadoras, en un orden logarítmico (Log_{10}) en cada una. En las de maduración se logra una eliminación de los patógenos, donde se prolonga el tiempo de permanencia y se favorece la sedimentación de huevos y larvas de Helminthos. Los efluentes de lagunas en serie, con tiempos de detención hidráulica menor a 10 días, presentan parásitos, cuando ese tiempo se eleva a 20 días, estos desaparecen del efluente.

Gráfico 51. Lagunas anaerobias. Facultativa y maduración- PTAR El Salguero- Valledupar



Fuente; Google Earth

Lagunas anaerobias

Estas son unidades de tratamiento de tratamiento para trabajar en ambiente anaerobio requieren: no presencia de oxígeno disuelto (OD) en la parte inferior y la temperatura mayor de 15°C. Por ello la remoción de DBO₅ es más probable en climas cálidos, con lagunas relativamente profundas.

La gran ventaja de las lagunas anaerobias es poder oxidar elevadas cargas orgánicas con buenas reducciones de DBO₅ y SS en áreas bastantes reducidas. Su principal desventaja es el olor producido principalmente por la liberación de sulfuro de hidrógeno (H₂S). El tiempo de detención hidráulica no se recomienda mayor a 5 días, porque funcionaría como laguna facultativa.

En estudios desarrollados en Brasil Campina Grande (Silva, 1981) en investigaciones con plantas piloto con periodos de detención entre 0,8 días y 5 días con temperaturas entre 25 °C y 27 °C se obtuvieron reducciones entre 70% y 80% de DBO₅ y SS respectivamente. Para lagunas anaerobias tratando aguas residuales domésticas con tiempos de detección de 2 días, se pueden obtener reducciones entre 60% y 70%.

La altura de las lagunas anaerobias varía entre 3 y 5 metros.

Lagunas facultativas

En este modelo de tratamiento (lagunas en serie) la laguna facultativa funcionaría como laguna secundaria, ya que recibe los efluentes de una laguna anaerobia, aunque podría recibir también de un digestor anaerobio de flujo ascendente (UASB) o de una unidad de tratamiento previa que realice tratamiento primario. También puede recibir directamente de un sistema preliminar y en ese caso funcionaría como tratamiento primario.

El tratamiento del agua residual en lagunas facultativas considera tres zonas: a) en la parte superior se establecen condiciones aerobias; es decir, existe oxígeno disuelto, b) una parte facultativa intermedia en donde las bacterias aerobias, anaerobias y facultativas (las bacterias facultativas pueden vivir tanto en condiciones anaerobias como aerobias) llevan a cabo la descomposición de la materia orgánica (DBO₅), y c) una zona anaerobia en la parte inferior de la laguna, donde los sólidos que sedimentan se descomponen de manera fermentativa.

La profundidad de esta laguna varía entre 1.5 a 2.5 metros. Los tiempos de detención son mayores a 7 días.

La gran ventaja de las lagunas facultativas es que no produce malos olores. Su mayor desventaja es la gran área que ocupan. La reducción de la DBO₅, es alrededor de 70% a 90%.

Lagunas de maduración

Las lagunas de maduración tienen como objetivo la eliminación de bacterias patógenas. Estas lagunas operan siempre al menos como lagunas secundarias, es decir, que como mínimo el agua residual ha pasado por un tratamiento antes de ser introducida en ellas.

También pueden ser utilizadas al final del tratamiento de otros sistemas como lodos activados, en sustitución de la cloración, que se utiliza normalmente como desinfección en estos sistemas de tratamiento.

Además de su efecto desinfectante, las lagunas de maduración cumplen otros objetivos, como son la nitrificación del nitrógeno amoniacal, eliminación en algún grado de nutrientes, clarificación del efluente y oxigenación de efluente.

Según información de la WHO/EMRO (1987)⁷⁶ referida en su libro por Mendoça, los periodos de detención de las lagunas de maduración varían entre 3 y 10 días o más para dos o más lagunas en serie. Para una laguna de maduración el tiempo de retención debe ser igual o mayor a 5 días.

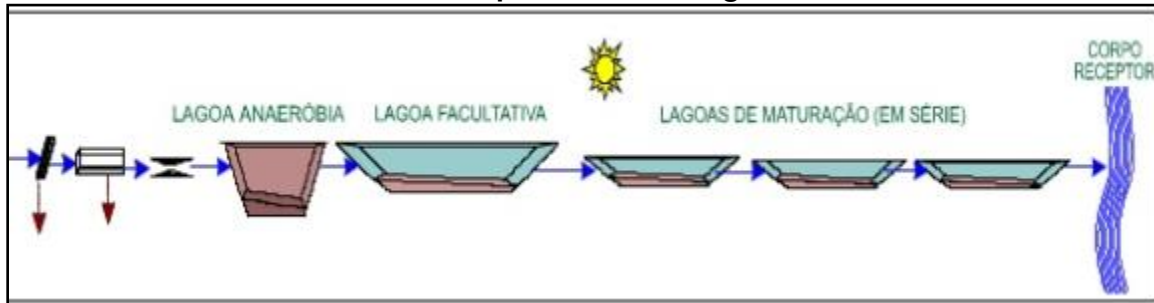
Dependiendo del número de huevos de helmintos presentes en el agua residual cruda y de los tiempos de detención en las lagunas anaeróbica y facultativa, puede ser necesario incorporar 1 o más lagunas de maduración para asegurar que el efluente final no contenga huevos de Helmintos como lo señala la OMS. De igual manera los coliformes fecales se reducirán dependiendo del orden de 10⁵ a 10⁶ /100 ml que ingresen a las lagunas de maduración y del tiempo de detención en las mismas y del número de ellas que se utilice con base en la formulación⁷⁷ para cumplir con el orden de magnitud que se espera tener en efluente final.

⁷⁶ WHO/EMRO (1987) Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning and Practice, Tech Pub. N.10. Alejandria. Egipto

⁷⁷ Mendoça en su libro recomienda el teorema de Marais (1974): Marais, G.V.R.- Journal of the Environmental Engineering División ASCE, 100,119, Estados Unidos.

En estas lagunas se manejan profundidades entre 0,6 m y 1,5 m. La configuración de un sistema de lagunas se puede observar en el esquema presentado en el Gráfico 52.

Gráfico 52. Esquema de funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales para reúso en agricultura



Fuente: <https://www.slideshare.net/ceshesol/fundamentos-de-tratamiento-por-lagunas>

Requisitos de implementación.

Para su implementación se requerirá inicialmente de un diseño que preferiblemente sea desarrollado por un experto nacional o internacional cuya experiencia en este campo sea completamente clara y verificable.

En este sentido los profesionales del área sanitaria, civil y ambiental son los llamados a desarrollar estos diseños y desde la misma Academia e instituciones que han abanderado procesos de similar naturaleza a través de los años. Se destacan en esa área la Universidad del Valle con el Instituto CINARA y todos sus programas de magister y Doctorado que han desarrollado investigaciones en el tema; la Escuela de Ingeniería Julio Garavito que cuenta con uno de los mayores especialistas de lagunas de Estabilización del país, el ingeniero Jairo Romero Rojas, Director de la Especialización en Saneamiento Ambiental; la Universidad Nacional; la Universidad de los Andes y la Universidad Javeriana.

La construcción de estas tecnologías requiere de Empresas de obras civiles, hidráulicas y sanitarias, que hayan instalado sistemas similares, que acrediten en su experiencia, construcción y puesta en operación de tratamientos de similar naturaleza y cuyos resultados puedan ser fácilmente verificables mediante certificaciones debidamente acreditadas. Igualmente, es recomendable que para verificar la experiencia se puedan realizar visitas a los sitios donde operan los sistemas y contar con resultados de análisis de su desempeño disponibles para su revisión y la inscripción de obras de esta naturaleza en el Registro Único de Proponentes.

Estos sistemas de manera similar a otros proyectos del área de saneamiento básico se diseñan para cumplir con los criterios establecidos en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, en cuanto a los periodos de diseño y proyecciones de población, entre otros. En general el periodo de diseño es de 25 años según lo establece el artículo 40 de la Resolución 330 de 2017 de MVCT.

En muchas zonas del país, como el Valle del Cauca, aún funcionan las lagunas que se construyeron a principio de la década de los noventa, las cuales pueden seguir operando si se lleva a cabo su ampliación, optimización o complemento para atender los nuevos requerimientos normativos y de crecimiento de la población.

La ventaja de estos sistemas es que, por ser sencillos, no requieren de mano de obra especializada para su operación y mantenimiento.

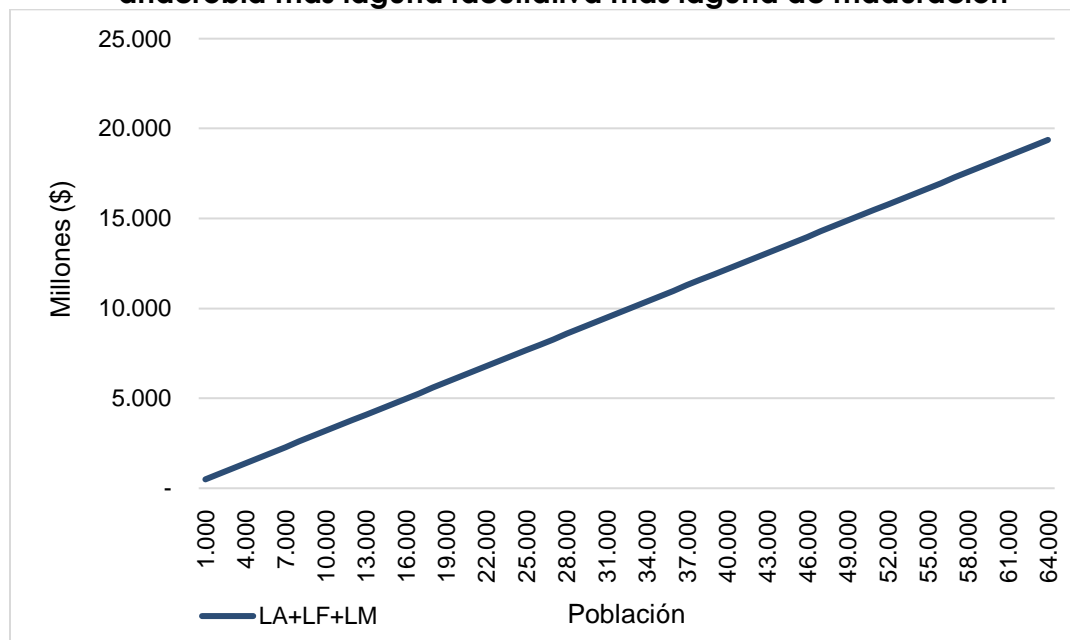
Costos

Según un estudio realizado en el año 2017⁷⁸, en el Gráfico 53 se presentan los costos asociados a la inversión de la tecnología de lagunas facultativas para el tratamiento de las aguas residuales. Con la información de la gráfica anterior se puede estimar el costo de inversión de la tecnología para reúso agrícola, en función de la población.⁷⁹

⁷⁸ KFW- 2017- Alejandro Gualy, et al - Consultoría Análisis institucional, técnico y financiero de los planes y proyectos requeridos para saneamiento de las cuencas de los Ríos Ubaté-Suárez y Río Pasto, para el cumplimiento de las metas en materia de descontaminación de las aguas residuales en el marco del Programa SAVER.

⁷⁹ Este es un acercamiento a costos por cuanto cada situación deberá ser valorizada y dependerá de las condiciones particulares de cada Proyecto.

Gráfico 53. Estimación de Inversión en pesos colombianos de 2017 para laguna anaerobia más laguna facultativa más laguna de maduración



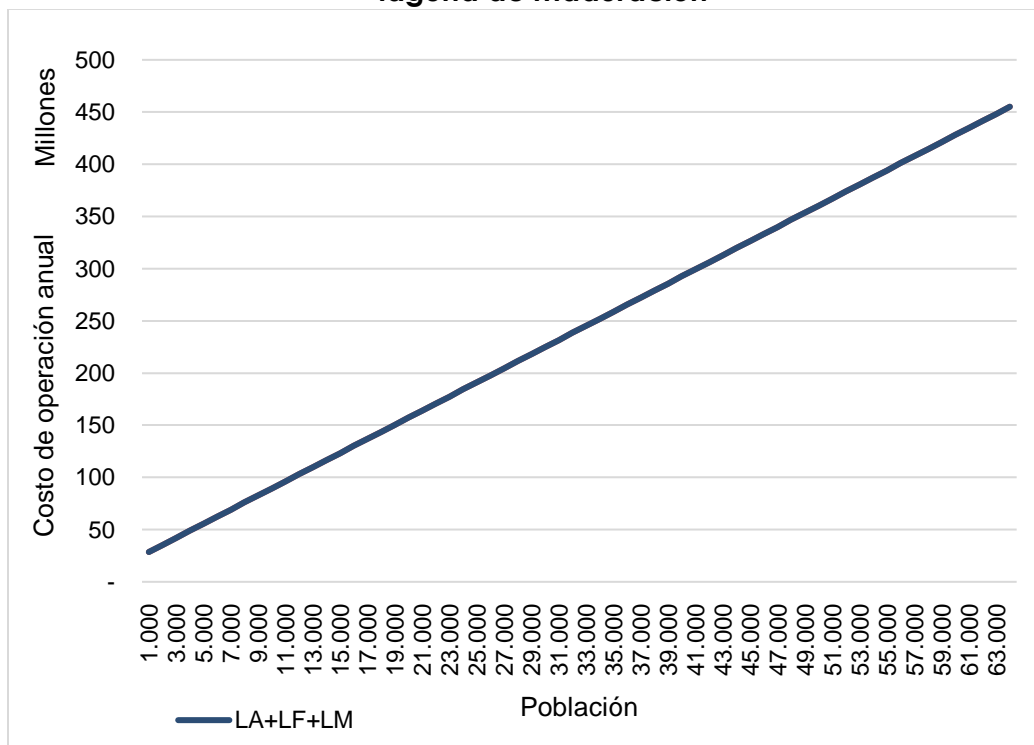
Fuente: KFW (2017)

| 6. LA+LF+LM | | |
|--------------------|--------------|---------------------------------------|
| Habitantes diseño | Total diseño | y construcción (\$ pesos colombianos) |
| 2.500 | | 936,894,832 |
| 5.000 | | 1,700,633,313 |
| 7.500 | | 2,444,023,999 |
| 10.000 | | 3,186,152,252 |
| Constantes | 299,646.52 | 194,135,362.19 |
| R2 | 99995% | 8,214,713.33 |

Fuente: KFW (2017)

Del mismo estudio, en el Gráfico 54 se presentan los costos de operación y mantenimiento para el mismo esquema de tratamiento.

Gráfico 54. Estimación de costos de operación y mantenimiento en pesos colombianos de 2017 para laguna anaerobia más laguna facultativa más laguna de maduración



Fuente: KFW (2017)

| 6. LA+LF+LM | | |
|-------------|-------------------|--|
| | Habitantes diseño | Total operación y mantenimiento (\$ pesos colombianos) |
| | 2.500 | 38.727.197 |
| | 5.000 | 55.652.273 |
| | 7.500 | 72.577.349 |
| | 10.000 | 89.502.425 |
| Constantes | 6.770,03 | 21.802.120,80 |
| R2 | 100.000% | 0.00 |

Fuente: KFW (2017)

4.1.1.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas biológicos a base de lodos activados y tratamientos terciarios.

Respecto a esta tecnología, en la revisión de experiencias internacionales se documentaron varios ejemplos de tratamiento con lodos activados, que pueden ser replicados en nuestro país. Esta tecnología se diferencia de las lagunas de

estabilización, en que deben ser implementadas en ciudades o municipios en los cuales no hay espacio o área suficiente para construir las lagunas. En cualquier caso, es necesario contar con recursos para hacer la inversión inicial del sistema y que sus efluentes tratados puedan ser mercadeados en especial con el sector agrícola. El valor del agua residual tratada como recurso, así como por su alto contenido de nutrientes que reduce el consumo de fertilizantes, son las variables a considerar como ingreso, para cubrir el costo de operación de la PTAR o al menos para reducir el costo de la tarifa que se debe cobrar a los usuarios por el tratamiento de las aguas residuales.

Esta tecnología requiere implementar un tratamiento primario; considerar los espacios para el tratamiento secundario que se reducen al colocar unidades compactas que manejan altas tasas de carga orgánica; y adicionalmente incorporar unidades compactas para el tratamiento terciario.

Tratamiento preliminar

Es de similar naturaleza al especificado para Plantas de tratamiento de aguas residuales con sistemas biológicos a base de lagunas (Ver numeral 0)

Tratamiento primario^{80 81}

Son unidades destinadas a reducir sólidos suspendidos. Dentro de estos se distinguen los sedimentadores primarios, las unidades de flotación y unidades de coagulación- floculación y filtración. Generalmente se utiliza el sedimentador primario que es la unidad que se recomienda para este caso. Se recomienda incorporar también un tanque de homogenización (ecualización) de caudales y cargas.

Tanque de homogenización (Ecualización).

Este es un tanque que se encarga de recibir los caudales y cargas vertidas en forma continua, para lograr un caudal constante o casi constante y homogéneo en adelante, lo que facilita los tratamientos posteriores y optimizar el desempeño de las unidades de tratamiento. Su instalación es lo más recomendable en sistemas compactos, aunque algunas variantes de reactores biológicos tienen capacidad de amortiguar dichas variaciones de carga y caudal.

⁸⁰ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, pág. 368 - 380

⁸¹ Acuatécnica, Tratamiento primario de aguas residuales. tomado de <https://acuatecnica.com/tratamiento-primario-aguas-residuales/>

Sedimentador (decantador) Primario⁸²

La finalidad de la sedimentación primaria es eliminar los sólidos fácilmente sedimentables y el material flotante y, por lo tanto, reducir el contenido de sólidos suspendidos del efluente antes de ingresar al tratamiento biológico. Estos sólidos de peso específico superior al del líquido tienden a depositarse y los de menor peso específico a ascender. Su implementación como paso previo al tratamiento biológico, reduce la carga aplicada en estas unidades.

Estos sedimentadores si están correctamente diseñados y operados deben eliminar entre un 50% y un 70% del sólido suspendidos y del 25% al 40% de la DBO⁶.

Estos tanques de decantación primaria, también se han utilizado como tanques de retención del agua pluvial y en este caso se proyectan para proporcionar tiempos de retención cortos 90 a 150 minutos a los caudales de exceso aliviados de alcantarillas unitarias. Su finalidad es eliminar parte sustancial de los sólidos orgánicos que, de otro modo, serían evacuados directamente al agua receptora y podrían formar depósitos de lodos perjudiciales.

Los tiempos de detención en esta unidad previo a un sistema de tratamiento biológico están del orden de 30 a 60 minutos.

Estos tanques pueden ser rectangulares o circulares y manejan profundidades entre 3 y 5 metros. En unidades pequeñas van provistos de fondos que tienen una inclinación de 45° a 60° para facilitar la evacuación de los lodos de forma continua o intermitente, por su parte inferior.

En caso de decantadores grandes esa práctica conduciría a tener que adoptar alturas prohibitivas, por lo que la pendiente del fondo se reduce al mínimo, en ese caso los lodos se evacuan mediante un sistema de rascado que los reúne en una fosa, de la que se extrae fácilmente. Estos lodos se deben llevar a espesamiento, tratamiento y deshidratación para su retiro como residuos sólidos o para acondicionamiento de suelos.

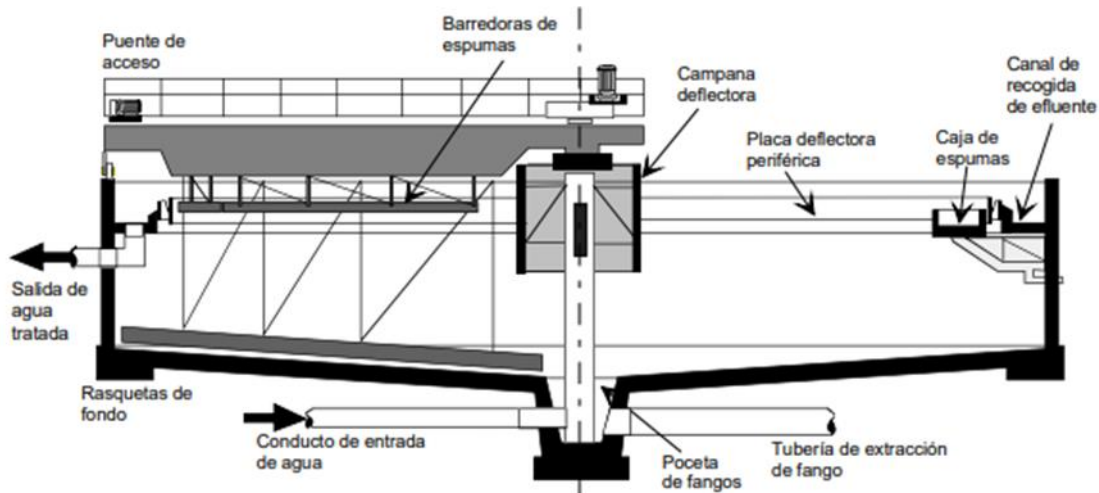
Para las espumas y sólidos que flotan en el decantador, se retiran regularmente de la superficie mediante un mecanismo que facilite su captación superficial hasta un sistema de colección y extracción del sedimentador, tipo

⁸² Fundamentalmente tiene las mismas características de un sedimentador secundario, con excepción del sistema de barredor de superficie para natas y espumas, que no se utiliza en el sedimentador secundario

barredor helicoidal trasversal, tubería perforada o colector tipo cadenas con rascadores que empuja o arrastra el material hasta tolvas para su evacuación.

El Gráfico 55 muestra detalles de un sedimentador primario circular.

Gráfico 55. Esquema de un decantador circular con puente



Fuente: Universidad Da Coruña - Inditex⁸³

Tratamiento secundario con base en Lodos activados⁸⁴

De aireación extendida

Los referentes internacionales más especificados de uso en el tratamiento de aguas residuales son los sistemas de aireación extendida. Los lodos Activados en general consideran la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo vía aerobia.

En el tratamiento biológico mediante los lodos activados, el residuo orgánico (en este caso el efluente de las aguas residuales que han tenido un tratamiento preliminar y primario) se introduce a un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido en el reactor se denomina líquido mezcla. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o aireadores que, a su vez, sirven para mantener el líquido mezcla en un régimen

⁸³ Decantación primaria convencional (FT-PRI-002) Universidad Da Coruña - Inditex 2013 - tomado de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Decantaci%C3%B3n+primaria+convencional.pdf/40f134f4-529a-d6ec-eafa-3eff20f8ad5d>

⁸⁴ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, pág. 450, 470-471, 530-541

de mezcla completa. Tras un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las viejas se conduce a un tanque de sedimentación donde las células se separan del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas es recirculada para mantener la concentración deseada de organismos en el reactor, mientras que la otra es purgada del sistema.

El papel clave de las bacterias es descomponer la materia orgánica producida por otros organismos vivos. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente.

En el reactor, o tanque de líquido mezcla, parte de la materia orgánica del agua residual es utilizada por las bacterias facultativas o aerobias con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en nuevas células. En realidad, solo una parte del residuo original es verdaderamente oxidado a compuestos de bajo contenido energético, tales como NO_3 , SO_4 y CO_2 ; el resto es sintetizado en materia celular.

El proceso de lodos activados es muy flexible y puede adaptarse a cualquier tipo de problema relativo al tratamiento biológico de aguas residuales. Del diseño convencional han aparecido diversas modificaciones que están referidas a cambios en los tiempos de detención, modelo de flujo, tiempo de retención celular (biomasa en el reactor), F/M (relación de alimento en forma de DBO_5 de ingreso al reactor) /microorganismos), carga orgánica aplicada por volumen de reactor, concentración de biomasa en el reactor, y caudal de recirculación de lodos Vs caudal de afluente al reactor, entre otros.

De las variantes del sistema convencional, uno de los más utilizados y referidos al presente estudio es el denominado de aeración extendida o prolongada, que se distingue por tener tiempos de detención hidráulicos altos de 18 a 36 horas, largos periodos de aireación, baja relación de alimento /microorganismo (F/M) (0,05-0,015 Kg DBO_5 /Kg ssvlm*d y altos tiempos de retención celular (20-30 días), lo que determina que genere menos biomasa y por ende de exceso de lodos a disponer⁸⁵. Por trabajar en la fase de muerte (Fase endógena) del crecimiento celular (ver Gráfico 56), el lodo de exceso correspondiente a esa biomasa a retirar, además de ser menor a otros de las variantes del sistema convencional, esté más estabilizado por la digestión aeróbica de los lodos dentro del sistema de aireación y requiera menos necesidades de tratamiento final para su disposición.

⁸⁵ Al trabajar en la fase de Muerte (Fase endógena) los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento disponible (sustrato) se haya en un mínimo. En ese caso los nutrientes que quedan de las células muertas se difunden con el objeto de proporcionar alimento a las células existente.

Gráfico 56. Curva de crecimiento bacteriano típico

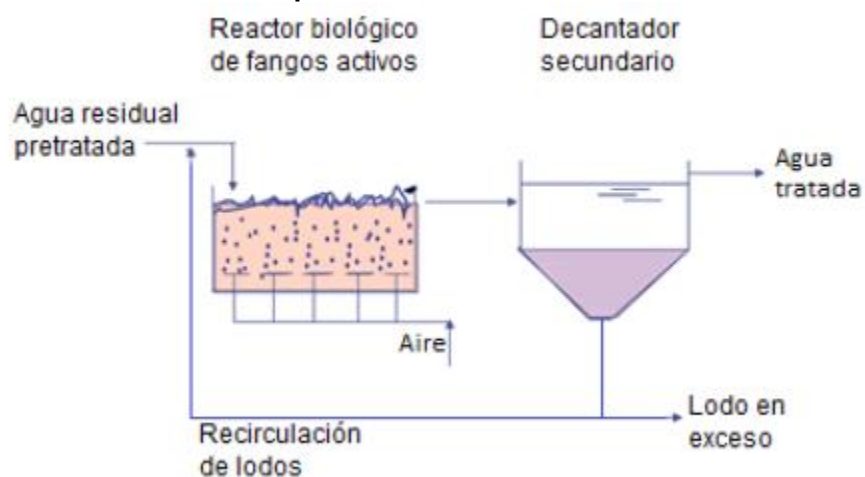


Fuente: tomado de <https://www.blogdequk.com/2011/08/sobre-el-crecimiento-microbiano.html>

Después del reactor se tiene un decantador secundario y la línea de retorno de lodos decantados (biomasa) que permitan mantener las concentraciones de la biomasa en los rangos de trabajo a que se estableció en el diseño. El exceso de lodos decantados en el sedimentador secundario se purga y va al sistema de manejo de lodos para su evacuación de la PTAR. Los sedimentadores secundarios son de iguales características a los sedimentadores primarios, pero no poseen barre lodos para quitar la nata y la espuma.

El Gráfico 57 muestra un detalle del esquema planteado de lodos activados de aeración extendida.

Gráfico 57. Esquema del sistema de lodos activados



Fuente: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/fangos-activos.htm>

SBR (Secuential Batch Reactor) – Reactores biológicos secuenciales⁸⁶

Un reactor discontinuo secuencial (SBR) es un sistema de lodos activados, cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de llenado y vaciado. Los procesos unitarios que intervienen son similares a los de un proceso convencional de lodos activados. En ambos sistemas intervienen la mezcla, la reacción y la sedimentación, pero tienen una diferencia importante, ya que, en las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en un sistema SBR los procesos tienen lugar en el mismo tanque.

En contraste con el sistema continuo, el agua se introduce al reactor en un tiempo establecido previamente, la degradación de la materia orgánica y la sedimentación se realizan en el mismo tanque. Las etapas del proceso son secuenciales y se repiten periódicamente, además de que se emplea aireación (proceso aerobio) para la degradación de la materia orgánica.

Los SBR tienen en común 4 etapas, las cuales se llevan a cabo en secuencia: etapa de llenado, para el ingreso del afluente al reactor; etapa de reacción, en la cual el reactor se somete o no a aireación, dependiendo de las necesidades del tratamiento; etapa de sedimentación que permite la separación de sólidos para lograr un sobrenadante clarificado como efluente; y etapa de vaciado, cuyo propósito es la extracción del agua clarificada del reactor.

Para el caso que nos ocupa (tratamiento de agua residual para reúso agrícola) el sistema se debe diseñar sin la incorporación de la Fase anóxica (anaerobia), que se puede colocar para conseguir además de la degradación de la materia orgánica, la eliminación de componentes como el nitrógeno y el fósforo como tratamiento terciario.

Al no diseñarse con la Fase Anóxica se puede contar con el nitrógeno y el fósforo como parte de la descarga para poder realizar la venta de nutrientes incorporados en el efluente para el riego, que permita valorizar el agua tratada aún más. Este aspecto debe sin embargo ser evaluado para cada caso en particular, pues dependiendo del contenido de estos elementos en el agua residual y de las necesidades del medio donde se realizará el riego, puede ser necesario implementar o no esa fase anóxica.

⁸⁶ J.F. Muñoz Paredes, M. Ramos. (2014) Reactores Discontinuos Secuenciales: Una Tecnología Versátil en el Tratamiento de Aguas Residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 24 (1), pág. 49 - 66 Tomado de <http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v24n1/v24n1a03.pdf>

El Gráfico 58 muestra una panorámica del SBR de la PTAR de Chiquinquirá.

Gráfico 58. Sistema SBR



Existen muchas más variantes de técnicas de tratamiento secundario de agua residual para reúso con destinación a riego a las presentadas, e incluso combinación de varias de ellas, sin embargo, se mostraron algunas de las que ya se tiene en el país, y hay experiencia y resultados que pueden monitorearse y revisarse para evaluar su implementación en varias regiones del país.

Tratamiento terciario

Existen tratamientos complementarios que servirán para asegurar que el efluente cumpla con los criterios de calidad para el reúso de las aguas residuales tratadas. Considerando el reúso con destinación a riego, el tratamiento que se debe implementar necesariamente en estos sistemas compactos es la desinfección.

Desinfección ^{87 88}

Está asociado a los procesos de destrucción selectiva de organismos causantes de enfermedades, que permita cumplir con los criterios de calidad establecidos por la FAO y la WHO. Normalmente y de acuerdo con la documentación estudiada de las experiencias internacionales estaría asociado a la utilización del cloro o con Ozono o rayos UV.

⁸⁷ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición pág. 282, 311-336

⁸⁸ EPA 832-F-99-062 – septiembre de 1999.- Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con cloro.

El cloro es utilizado universalmente en forma de cloro gaseoso o hipoclorito de sodio o de calcio, y dióxido de cloro.

Además de las variables ambientales a medir, Ph y temperatura, los parámetros que se deben medir son el tipo y No. de organismos (NMP) y el cloro residual después de un periodo de tiempo.

Otro aspecto importante para considerar en los diseños es el tiempo de contacto, dado que pueden existir interferencias por presencia de otros compuestos que van a reaccionar con el cloro, incluida la materia orgánica presente con enlaces no saturados y los compuestos de nitrógeno, entre otros, y por la edad de los microorganismos. Entre un cultivo bacteriano sea más joven (V.gr. 1 día) con dosis similares de cloro con respecto a un cultivo de más edad (10 días o más) va a requerir mucho menos tiempo para que el proceso de cloración sea más efectivo.

Para estos procesos de cloración se utilizan los denominados tanques de contacto que deben incorporar los equipos o aditamentos hidráulicos que permitan generar turbulencia y los volúmenes adecuados para dar el tiempo de contacto requerido.

Entre las ventajas de este sistema se destacan:

- La cloración es una tecnología bien establecida.
- En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono.
- Cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial, y puede ser medido para evaluar su efectividad.

El Gráfico 59 muestra un tanque de contacto para cloración en una PTAR de aguas residuales.

Gráfico 59. Tanque de cloración de aguas residuales



Fuente: Tomado de <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/cloracion-en-los-procesos-de-tratamiento-de-aguas-residuales>

Otro sistema de desinfección que se pueden utilizar es el ozono, que además puede servir para oxidar materia orgánica refractaria. Para su uso se requiere de equipamiento que permita su generación in situ a partir de aire u oxígeno puro. No dejan residualidad en el efluente.

El tratamiento con ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta⁸⁹; sin embargo, los costos de inversión, así como los gastos de mantenimiento no son competitivos con las otras alternativas disponibles. Por lo tanto, el ozono es utilizado con poca frecuencia, principalmente en casos especiales en los cuales otras alternativas no son efectivas.

También se puede utilizar la desinfección con rayos UV⁹⁰. Este sistema tiene entre sus ventajas un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión) y requiere menos espacio que otros métodos. En todo caso también tiene desventajas frente a los otros métodos cuando por efectos de la turbidez o de presencia de SST se bloquea la desinfección, también es más costosa que la desinfección con cloro y requiere mantenimiento preventivo más exigente por la acumulación de sólidos en los tubos de luz.

⁸⁹ EPA 832-F-99-063 – septiembre de 1999.- Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con ozono.

⁹⁰ EPA 832-F-99-064 – septiembre de 1999.- Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Desinfección con Luz Ultravioleta.

Tratamiento, evacuación y disposición de lodos⁹¹

Los sólidos extraídos por los diversos métodos desde las PTAR, incluyen arenas, basuras y lodos que se constituye en el subproducto de más importancia en los procesos de tratamiento. Las arenas y basuras retirados en el sistema preliminar se pueden manejar como residuos con destino a rellenos sanitarios, mientras que los lodos de los sistemas de decantación primaria y secundaria requieren un manejo y tratamiento diferenciado.

Los lodos se presentan en forma de líquido o líquidos semisólido que contiene hasta 12% de sólidos, dependiendo de las operaciones y procesos utilizados. Los lodos se constituyen en el problema más complejo de manejo en una PTAR, tanto por su condición de residuo y aspecto asociado a él, como por la composición de carácter orgánico, que al descomponerse genera problemas de olores y presencia de insectos, entre otros. Solo una pequeña parte es materia sólida. Por lo tanto, el objetivo de ese manejo es reducir el contenido orgánico y el agua del lodo.

En tal sentido se desarrollan varios procesos que deben ser incorporados: el espesamiento, la estabilización, el acondicionamiento para su deshidratación y la deshidratación misma. Ya teniendo el lodo estabilizado y con el menor grado de humedad posible, se podrá evacuar para su aprovechamiento o en el peor de los casos para disposición final en relleno sanitario.

Espesador de lodos ^{92 93}

El espesado es un procedimiento utilizado para incrementar el contenido de sólidos del lodo por eliminación de parte de la fracción líquida. Este proceso consiste en concentrar los lodos provenientes de los decantadores de concentraciones, que normalmente salen del 0,8% de esas unidades hasta el 4% que se alcanzan en los esperadores, lo que permite reducir el volumen de lodos a una quinta parte del volumen original. El objetivo principal es el incremento de la eficacia y la optimización económica de los procesos posteriores.

El espesado se consigue generalmente, por medios físicos como son la sedimentación por gravedad, la flotación y la centrifugación.

⁹¹ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, Cap. 11 Pág. 628-762.

⁹² Ibídem Pág. 657-665

⁹³ Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos- Condorchem – Envitech. tomado de <https://blog.condorchem.com/tag/espesamiento/>.

En los espesadores a gravedad se emplea la fuerza de la gravedad. La alimentación se produce por la zona central, en donde se sedimenta y se compacta para proceder en su parte inferior a la recogida como lodos espesados para ser enviados a los procesos posteriores de tratamiento, deshidratación y disposición. En la parte superior queda el sobrenadante, que es devuelto al sedimentador. Este sistema se emplea en lodos primarios, fisicoquímicos y mixtos que decantan bien por gravedad. Los lodos biológicos decantan lentamente. El diseño del tanque es muy similar a un tanque de sedimentación convencional, generalmente circular.

En el espesamiento por flotación, el lodo se concentra en la parte superior, por la unión de microburbujas, generalmente de aire, a los sólidos en suspensión, que acaban siendo menos densos que el agua. El aire se disuelve en el agua, manteniendo la solución a una presión elevada. Cuando se despresuriza la solución, el aire disuelto se libera en forma de burbujas finamente divididas, que arrastran el lodo hasta la parte superior desde donde es extraído. Este tipo de sistema está indicado para el espesado de fangos biológicos debido a su baja capacidad de sedimentación.

En cuanto a la centrifugación, hay que señalar que se pueden utilizar tanto para espesar como para deshidratar. Para el caso de espesado su aplicación está dirigida específicamente para los lodos en exceso de los lodos activados. Generalmente suelen ser equipos caros que requieren medidas adecuadas de mantenimiento.

Estabilización de lodos

Los lodos se estabilizan con el fin de:

- Reducir los patógenos
- Eliminar olores
- Reducir o eliminar la capacidad de putrefacción de la materia orgánica.

El éxito de alcanzar estos objetivos está relacionado con los efectos de la operación o proceso de estabilización sobre la fracción volátil u orgánica del lodo. La supervivencia de los patógenos, el desprendimiento de los olores, y la descomposición se producen cuando se permite que los microorganismos se desarrollen sobre la fracción orgánica del lodo. Los medios para eliminar estas condiciones perjudiciales a través de la estabilización son:

- La reducción biológica del contenido volátil.

- La oxidación química de la materia volátil.
- La adición de productos químicos al lodo para hacerlo inadecuado para la supervivencia de los microorganismos.
- La aplicación de calor con el objeto de desinfectar y esterilizar el lodo.

Las tecnologías disponibles son la estabilización biológica y la estabilización química.

En la **estabilización biológica** se destacan:

- **La Estabilización mediante Digestión Anaeróbica:** Tal vez es una de las más importantes cuando se busca cerrar los ciclos productivos y de subproductos en los controles ambientales, pues además de cumplir con el objetivo de degradar la materia orgánica, se libera energía disponible por el metano (CH_4), que por su capacidad calórica es fuente de energía que puede ser aprovechada en las instalaciones de la PTAR para suplir necesidades de energía y disminuir los costos de operación. Este proceso se desarrolla en ausencia de oxígeno, liberando además del metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2) y el agua (H_2O), gracias a la acción de algunos tipos de bacterias.
- **La Estabilización mediante digestión aeróbica:** Proceso biológico en el que, por acción microbiológica, se oxida la materia orgánica, con excelentes resultados el proceso de estabilización del lodo, mediante un aporte de oxígeno en los digestores abiertos. De este modo, se reduce la masa final del lodo, modificándolo para adecuarlo a procesos posteriores. Su principal desventaja es el costo elevado de consumo energético para el suministro del oxígeno necesario y que no tenga la posibilidad de recuperar un subproducto, como el metano del anaeróbico para suplir necesidades energéticas de la PTAR.
- **Estabilización mediante compostaje,** es un proceso mucho menos utilizado, en el cual la descomposición biológica y estabilización de la materia orgánica se hace en condiciones controladas y aeróbicas, desarrollando temperaturas termófilas, producto del calor generado biológicamente. El resultado es un producto estable y libre de patógenos. La Materia Orgánica se descompone en CO_2 , agua, minerales y materia orgánica estabilizada. Es necesario un adecuado control de los parámetros críticos (pH, aireación, humedad, relación C/N) para evitar condiciones anaeróbicas en la masa de compostaje que provoquen aumento de olores.

- **La Estabilización Química**, es una alternativa a la estabilización biológica para el tratamiento de lodos. El objetivo de este tipo de estabilización es reducir o minimizar los patógenos y reducir sustancialmente los microorganismos capaces de producir olores. Se utilizan procesos tales como:
 - **Estabilización con cal**, El producto aplicado mayoritariamente es la cal. Se añade al lodo la dosis adecuada para mantener el pH en 12 durante el tiempo suficiente (mínimo 2 h) para eliminar o reducir los microorganismos patógenos y los responsables de los olores. Es utilizado en plantas de tratamiento pequeñas o como sistema alternativo a otros implementados, durante periodos de tiempo que aquellas se encuentran fuera de servicio, también puede servir como complemento adicional a otro sistema implementado.
 - **Oxidación con cloro** Consiste en una oxidación química mediante la aplicación de dosis elevadas de gas cloro, que se añade generalmente directamente al lodo en un reactor cerrado durante un corto periodo de tiempo.

También se puede utilizar la estabilización térmica, que consiste en que el lodo es calentado a temperaturas que varían entre 160-210 °C, durante un periodo corto de tiempo y presiones por encima de 2,75 MN/m² (Newton metro/metro cuadrado). Además de tratamiento este sistema sirve de acondicionamiento, ya que acondiciona el lodo favoreciendo la deshidratación de los lodos sólidos si necesidad de utilizar procesos químicos.

Acondicionamiento de lodos

Este se realiza con el fin de mejorar las características de deshidratación. Los métodos más utilizados son:

- Adición de productos químicos
- Tratamiento térmico (señalado anteriormente como sistema de estabilización también).

En cuanto a la adición de productos químicos, consiste en agregar sustancias que dan como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. Se usa antes de cualquier proceso de secado. Los productos comúnmente utilizados son cloruro férrico, la cal, el sulfato de aluminio y polímeros orgánicos. Esto es más fácil de dosificar y suelen ser más económicos.

Deshidratación

Es una operación física (mecánica) unitaria utilizada para reducir el contenido de humedad del lodo y su volumen.

Sus objetivos principales son:

- Aumentar el contenido de materia seca del lodo
- Disminuir los costos de transporte por reducción de volumen
- Mejorar el manejo y transporte de los lodos
- Evitar olores
- Aumentar el poder calorífico por disminución de la humedad

Los sistemas más extendidos son los mecánicos por encima de los naturales.

Entre los **mecánicos** se destacan:

- **Centrifugas:** Consisten en un tambor cilindro-cónico de eje horizontal que se fundamenta en la fuerza de centrifugación para la separación de la fase sólida del agua.
- **Filtro de banda:** Es un sistema de alimentación continua de fango, donde se realiza también un acondicionamiento químico, generalmente con polielectrolitos. Se produce un drenaje por gravedad y después se hace pasar al fango por una aplicación mecánica de presión para que se produzca la deshidratación, gracias a la acción de una tela porosa.
- **Filtro de prensa:** Consta de una serie de placas rectangulares verticales dispuestas una detrás de otra sobre un bastidor. Sobre las caras de estas placas se colocan telas filtrantes, generalmente de tejidos sintéticos. El espacio que queda entre dos placas, en su parte central hueca, es el espesor que adquirirá la torta resultante. Este espesor puede oscilar entre 15-30 mm.

Hoy en día los fabricantes de Equipos ofrecen sistemas que combinan el espesamiento y la deshidratación de lodos. Estas son prensas de tornillo, que pueden ser alimentadas con lodo crudo (< 1% materia seca) y generan lodo de consistencia granulosa de hasta un 40% de contenido de materia seca. En aplicaciones típicas reducen el volumen y peso del lodo a la vigésima parte de la cantidad inicial.

El Gráfico 60 muestra detalle de tipos de equipos de deshidratación

Gráfico 60. Deshidratadores mecánicos de lodos



Fuentes:

<https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Tecnolog%C3%ADas+de+deshidrataci%C3%B3n+de+fangos.pdf/50ea3d5e-f094-7bff-97af-5573fef89055>

<https://estruagua.com/filtro-prensa-murano-hidraulico-para-la-deshidratacion-de-lodos/>

<https://www.tratamiento-de-aguas.cr/lodos-deshidratacion-secado/>

La deshidratación natural se hace con **lechos de secado**⁹⁴ que también se denominan eras de secado. Esta práctica es la más económica, pero se utiliza generalmente para poblaciones pequeñas o medianas. Se recomienda que para poblaciones mayores de 20.000 habitantes se utilicen otros medios de deshidratación, pues el costo de inicial, el costo de extracción de lodos y de sustitución de arenas, así como la necesidad de una gran superficie, imposibilitan su uso en grandes municipios.

Para su construcción se utilizan eras individuales donde se deposita el lodo digerido extendiéndolo sobre la misma en capas de 20 a 30 cm y se deja secar. Posteriormente se puede llevar a un relleno sanitario o como material de relleno o acondicionador de suelos. Generalmente se colocan en sitios aislados para evitar quejas de la población aledaña y se cubren como en el caso de los invernaderos, para mantener la deshidratación continua durante todo el año, independientemente de las condiciones climatológicas. Aunque al ser lodo digerido no se esperan malos olores, es preferible situarlas alejadas de las viviendas a más de 100 m de las más próximas.

El lodo se deshidrata por drenaje a través de la masa del mismo lodo y de la arena de soporte (de 0,22 m a 0,3 m), así como por la evaporación de la superficie expuesta al aire. La mayor parte del agua deja el lodo por acción del filtrado, por tanto, es esencial prever un sistema adecuado de drenaje para retorno del lixiviado a cabeza del proceso. El lodo seco se retira manualmente con palas en carretillas

⁹⁴ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición, Cap. 11 Pág. 718

o camiones o con una maquinaria que permita rascar el lodo seco y cargar los vehículos de retiro.

Otro sistema natural que se puede usar son las **lagunas de secado** para utilizar en zonas donde la evaporación sea intensa. No son adecuadas para deshidratación de lodos crudos, o estabilizados con cal o lodos que den lugar a sobrenadantes de alta concentración y que puedan ser efuente potencial de olores y molestias. El lodo que llega a estas lagunas no requiere acondicionamiento. En estas lagunas se manejan espesores de lodos entre 0,75 a 1,25 m. La evaporación es el principal mecanismo de deshidratación.

El Gráfico 61 muestra un detalle de un sistema de lechos de secado.

Gráfico 61. Lechos de secado.



Fuente: PTAR municipio Funza Cundinamarca

Requisitos de implementación

La construcción de estos sistemas requiere de Empresas especialistas en el tratamiento de aguas residuales, cuya trayectoria a nivel nacional e internacional sea comprobable y que de ser nacional cuente con aliados estratégicos del nivel internacional que hayan incursionado en el campo del reúso de las aguas residuales tratadas.

Por lo general estas empresas cuentan con tecnología disponible y con una base de ingeniería fuerte con conocimientos extensos sobre tratamiento de aguas, y realizan montajes, suministros de equipos y obras civiles con aliados estratégicos en cada campo que permiten en conjunto entregar los suministros adecuados para esos desarrollos.

Para la selección de empresas para estos suministros, es recomendable que su experiencia sea fácilmente verificable mediante certificaciones debidamente acreditadas, revisión de la experiencia de la tecnología en visitas a los sitios donde

operan los sistemas instalados por ellos y sus aliados y verificación de los resultados de análisis de su desempeño disponibles para su revisión.

Estos sistemas de manera similar a otros proyectos del área de saneamiento básico se diseñan para cumplir con los criterios establecidos en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS, respecto a los periodos de diseño, proyecciones de población, y muchos otros que se han elaborado para la implantación de estos proyectos. En general el periodo de diseño es de 25 años según lo establece el artículo 40 de la Resolución 330 de 2017 de MVCT, sin embargo, se debe considerar lo establecido en el parágrafo del mismo artículo, en cuanto a proyectos especiales para agua y saneamiento básico, como los provenientes de alianzas público – privadas que señala que se podrá aceptar un periodo de diseño mayor, siempre y cuando se efectúen los análisis técnicos y económicos que lo justifiquen.

Los sistemas de Lodos activados de aireación extendida requieren de un mantenimiento continuo de la infraestructura y equipamiento instalado y reposición de bombas, agitadores y partes de equipos y unidades que pueden tener desgaste por su uso continuo, lo que debe quedar claramente especificado durante la fase de licitación y presentación de las ofertas.

En nuestro país ya existen empresas que han incursionado en el tema del reúso con sistemas compactos de similar naturaleza al de lodos activados de aireación extendida, que tienen capacidad para desarrollar proyectos de la naturaleza que se está relacionando en el presente estudio.

Entre las principales se pueden destacar:

- **Veolia:** A través de Veolia Water Technologies, cuya tecnología es ampliamente reconocida en el ámbito internacional y desarrollo de proyectos entre los que merece destacar:
 - La planta de tratamiento de reúso para consumo humano referenciadas en el Informe 2, en Windhoek – Namibia. En ese país a través de Wingoc, un consorcio internacional formado por Veolia, Berlinwasser International y Wabag, suscribió un contrato de 20 años para tratar 16.000 m³/día de agua residual tratada en combinación con agua cruda de un acuífero para consumo humano en esa ciudad de Sudáfrica.
 - Estación Regeneradora de Agua del Camp de Tarragona (España) para uso Industrial, derivada de agua residual doméstica tratada de ese municipio.

- Proyecto en Durban Sudáfrica para tratar agua residual doméstica para su reúso en Mondi, una industria papelera y SAPREF, una refinería de petróleo. Mediante una alianza público privada se le asignó a Durban Water Recycling, consorcio liderado por Veolia, el financiamiento, diseño, construcción y operación de la planta de tratamiento terciario para agua residual por 20 años.

Veolia como Empresa opera en el país en otras áreas de saneamiento ambiental (residuos, agua potable) y puede verse como una oportunidad que la experiencia adquirida por Veolia Water Technologies, se pueda aprovechar en el país.

- **Ticsa Colombia:** Empresa del grupo EPM. A la fecha el grupo EPM además de incursionar en el tratamiento de las aguas residuales, ha desarrollado el tratamiento de aguas residuales para reúso con destinación a la industria en México, a través de Ticsa, líder en el campo de las aguas residuales. En ese país se está trabajando en el reúso del agua residual municipal tratada de Ciudad Madero -Tamaulipas en la industria petrolera PEMEX. De igual manera Ticsa tiene presencia en Colombia y podría atender el mercado colombiano.
- **Biotecs Ingeniería de tratamiento de aguas:** Empresa Colombo Brasileira que ha incursionado en el tratamiento de aguas residuales para el reúso en el sector industrial en Brasil, Perú y México, entre otros. En México ha trabajado en alianza con Alvimont Ingeniería, S.A. de CV. Biotecs tiene sede propia en Colombia hace 20 años.

Existen Empresas Constructoras en el país con capacidad de desarrollar proyectos de estas características que pueden establecer alianzas con Empresas Especialistas de aguas residuales del exterior para incursionar en Colombia. Este tipo de empresas son las que actualmente están ejecutando los proyectos de PTAR en Colombia. Para este nivel se hace referencia al Grupo Acciona que realizó la construcción de la PTAR Aguas Claras en Bello Antioquia de EPM y de la PTAR de Atotonilco en México y hace actualmente su explotación con reúso del agua residual tratada para riego.

También existen otras empresas cuya casa matriz tiene ubicación en otros países, pero que tienen una representación en Colombia. Estas empresas podrían también desarrollar los proyectos, aunque su costo puede ser más alto por cuanto el suministro debe ser importado. Algunos nombres de estas empresas

son la Empresa brasilera Fox Water que tiene un representante comercial en Colombia y algunas empresas de Israel y Alemania.

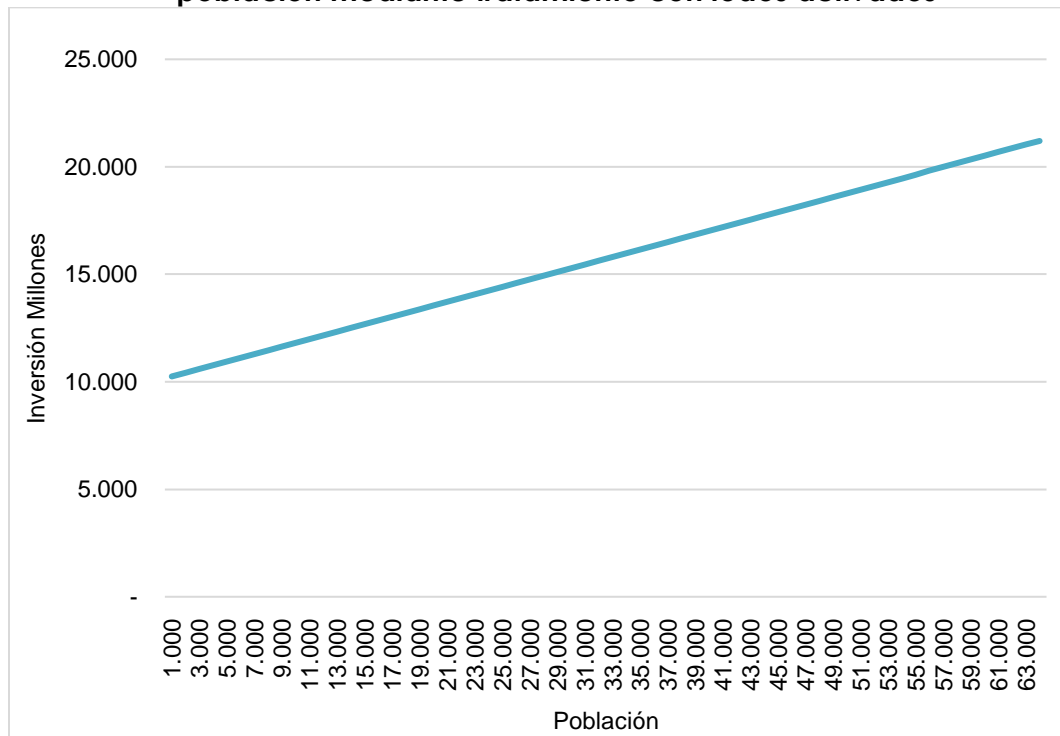
Costos

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados y tratamiento terciario (desinfección) derivados de aguas residuales domésticas para reúso agrícola no han sido costeados en nuestro país, ni tampoco se han establecido costos de operación. Los referentes al respecto han sido los sistemas implementados fuera del país y de los cuales se entregaron costos en el segundo informe.

Sin embargo, se podría establecer algún costo aproximado con base en estudios de costos realizados en el país e incrementar su valor con el costo de tratamientos terciarios para lograr alcanzar niveles de calidad similares a los establecidos por la WHO y la FAO.

Del estudio KFW (2017) se establecieron costos para el tratamiento de aguas residuales con sistema de lodos activados con cloración en tanque de contacto, que podría ser utilizados como referencia de información. El Gráfico 62 muestra los costos de inversión de la Tecnología en función de la población y el Gráfico 63 los costos de operación y mantenimiento anual.

Gráfico 62. Costos de inversión en pesos colombianos de 2017 en función de la población mediante tratamiento con lodos activados

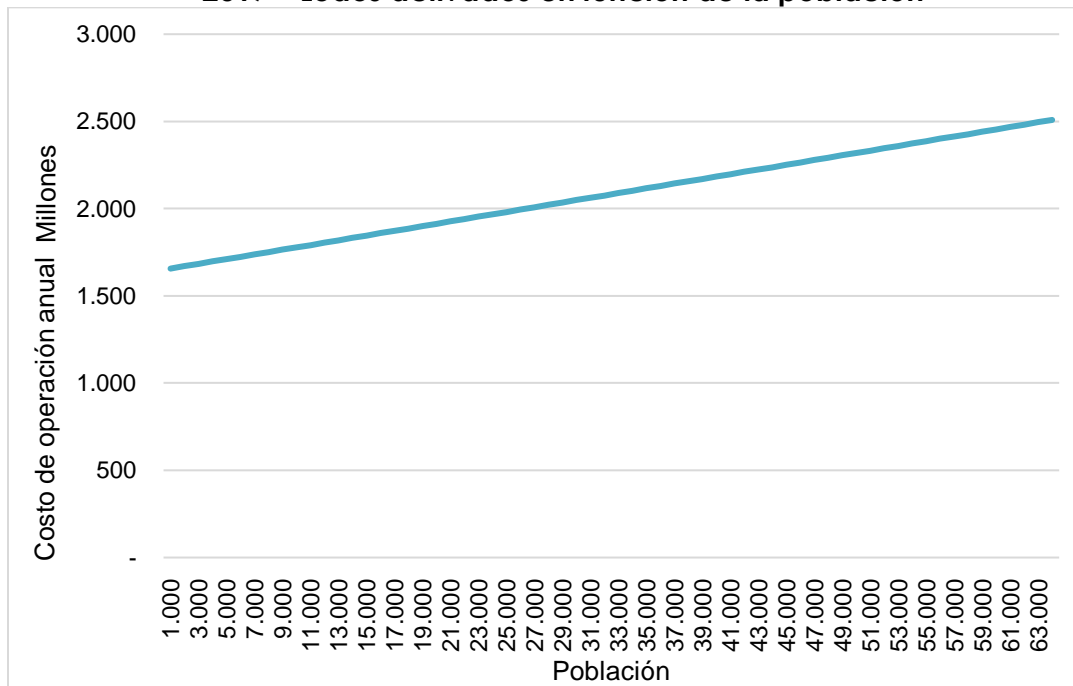


Fuente: KFW (2017)

| LODOS ACTIVADOS | | |
|-------------------|--|-------------------|
| Habitantes diseño | Total diseño y construcción (\$ pesos colombianos) | |
| 15.000 | 5,887,167,338 | |
| 83.491 | 32,067,620,987 | |
| 563.916 | 111,111,148,463 | |
| 601.678 | 110,998,635,726 | |
| Constantes | 173,848.87 | 10,076,206,030.40 |
| R2 | 98,587% | 7,893,684,645.67 |

Fuente: KFW (2017)

Gráfico 63. Costos de operación y mantenimiento en pesos colombianos de 2017 – Lodos activados en función de la población



Fuente: KFW (2017)

| Lodos activados | | |
|-------------------|--|------------------|
| Habitantes diseño | Total operación y mantenimiento (\$ pesos colombianos) | |
| 15,000 | 477.798.806 | |
| 83,491 | 4.489.500.000 | |
| 563,916 | 6.956.674.304 | |
| 601,678 | 11.745.749.765 | |
| Constantes | 13.526,31 | 1.642.827.822,14 |
| R2 | 78,953% | 2.648.909.778,50 |

Fuente: KFW (2017)

En el anexo 4 se presenta un cuadro resumen de las tecnologías enunciadas con todos los aspectos detallados y otros de importancia para el reúso agrícola.

4.1.2. Reúso domestico

En Colombia, bajo la legislación actual no hay posibilidad de hacer reúso directo de aguas residuales para consumo doméstico (Resolución 1207 de 2014). Igualmente, de acuerdo con las conversaciones sostenidas con el Ministerio de Ambiente, en las mesas intersectoriales en las que se está llevando a cabo la revisión de la norma de reúso, el Ministerio de Salud ha manifestado que no

considera viable el reúso de aguas residuales para consumo doméstico, por los riesgos de salubridad que esto implica. En todo caso, con base en la revisión de experiencias internacionales, a continuación, se presentan las tecnologías que pueden ser empleadas.

En general, en Colombia se hace un uso indirecto del agua residual, dado que las captaciones de agua para consumo doméstico se realizan aguas abajo de las descargas de aguas residuales que hacen otras poblaciones, las cuales en su mayoría no tienen algún tipo de tratamiento.

Un ejemplo de esta situación es la ciudad de Cali, en donde la captación de agua que posteriormente es potabilizada para consumo humano en la planta de Puerto Mallarino, se hace aguas abajo de la descarga de las aguas residuales de la misma ciudad. En ese caso el agua residual que se vierte al río ha tenido un proceso previo de tratamiento primario avanzado.

Teniendo en cuenta el bajo porcentaje de tratamiento de las aguas residuales en el país, en muchos casos los vertimientos a los cuerpos de agua aguas arriba de las captaciones ocasiona mayores costos de tratamiento de potabilización y obliga a las poblaciones aguas abajo a buscar otras fuentes para consumo humano.

Es importante mencionar que, si se diera cumplimiento a lo establecido en el Decreto 631 de 2015, las aguas residuales podrían ser usadas indirectamente, como se hace actualmente, pero con una mejor calidad, lo cual conlleva beneficios para quienes las quieran reusar.

A continuación, se presentan las tecnologías de tratamiento de aguas residuales para reúso doméstico que son utilizados en otros países y que están referenciados en diferente literatura (Watereuse (2015)⁹⁵ Metcalf Eddy 6⁹⁶).

La concepción del sistema para reúso en consumo doméstico implica que antes de un sistema de tratamiento de agua potable debe existir un sistema de tratamiento aguas residuales avanzado. Este, según regulaciones establecidas, en el caso de Estados Unidos, implica que el agua residual de origen doméstico generalmente ha tenido procesos de tratamiento como los especificados anteriormente para lodos activados de aeración extendida, al que se debe incluir un tratamiento terciario que involucra la remoción de nutrientes (fósforo, nitrógeno)

⁹⁵ Tchobanoglous, et al. Framework for direct Potable Reuse. Water Environment Federation. American Water works Association. National Water Research Institute. 2015

⁹⁶ Desarrollado con base en Metcalf Eddy – Ingeniería Sanitaria tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales 2ª edición Pág. 497-498 y 790-800

y la desinfección y se tiene otro tratamiento adicional para tratar ese efluente que se denomina Tratamiento de agua avanzado.

Entre las técnicas recomendadas para tratamiento de aguas residuales para uso directo en consumo doméstico se deben considerar esquemas como los que se señalan a continuación.

4.1.2.1. Sistema de lodos activados de aeración extendida con tratamiento terciario y tratamiento adicional avanzado

Se opta por el sistema similar al mencionado en el numeral 4.1.1.2. de aeración extendida incluyendo el Tratamiento preliminar, Tratamiento primario y Tratamiento, evacuación y disposición de lodos. El sistema debe incorporar un tanque de Homogenización (equalización) de caudales y carga.

Tratamiento terciario

En este tratamiento se incluye el proceso de remoción de nutrientes, sólidos finos residuales y la desinfección como se ya se especificó anteriormente.

Remoción de nitrificación- Desnitrificación

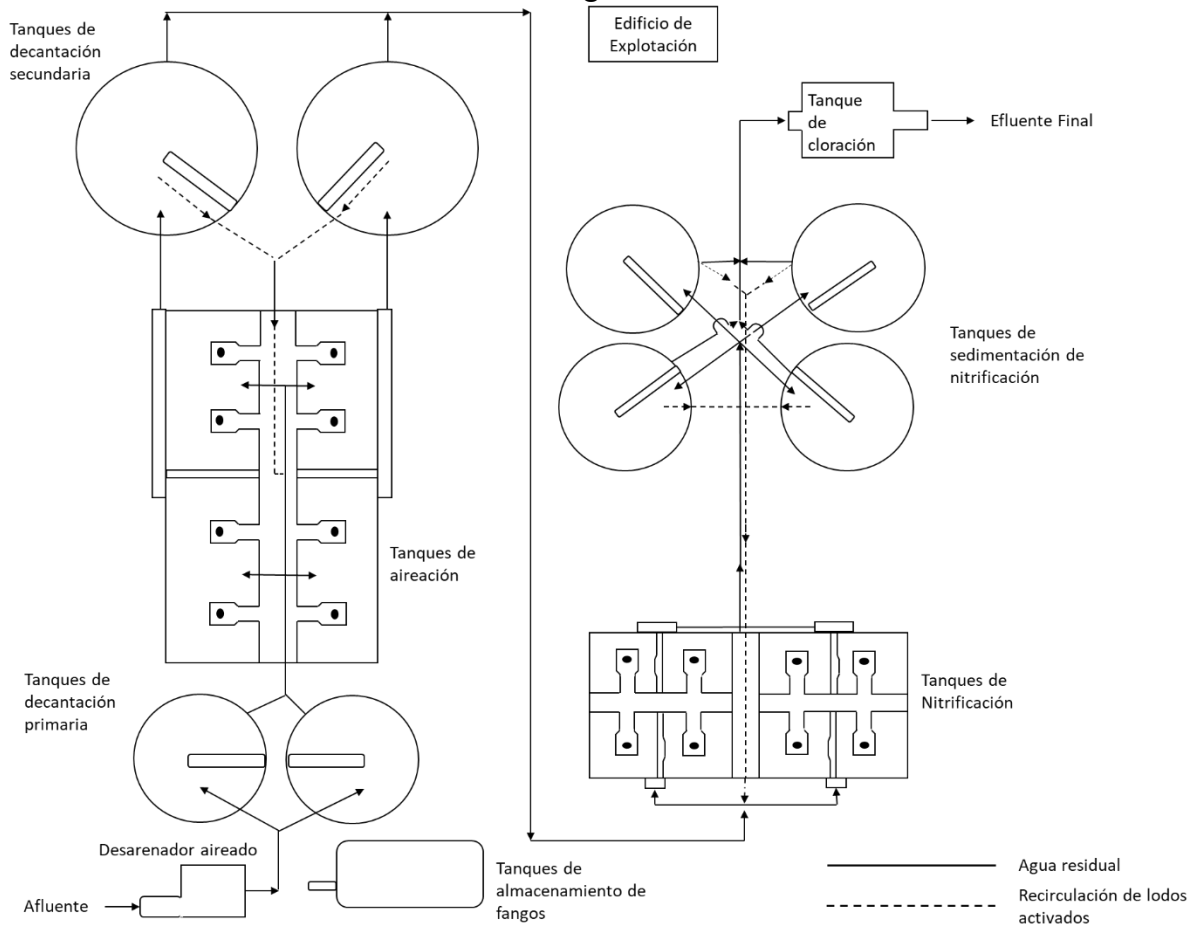
La instalación de esta unidad es recomendable, porque si bien las membranas de tratamiento avanzado pueden recibir estos compuestos y hacer su remoción, también es cierto que al realizar la remoción previa del nitrógeno se evitará incrustaciones más continuas en las membranas con una reducción de los costos de mantenimiento de las mismas, que permite alargar su vida útil y mejorar el desempeño del sistema de tratamiento avanzado.

En primera instancia se debe trabajar en la remoción del nitrógeno. Cuando se revisa el proceso de lodos activados, normalmente se hace referencia a la degradación biológica aerobia de la materia orgánica carbonácea, pero es necesario estabilizar aquellos compuestos inorgánicos que puedan ejercer una demanda de DBO. El compuesto más importante es el amoníaco porque su presencia puede estimular la disminución del oxígeno en la corriente receptora por el proceso biológico de nitrificación. En la nitrificación, el amoníaco se oxida biológicamente a nitrato. Ese es el estado de oxidación final de los compuestos de nitrógeno y es un producto estabilizado. En la práctica, la nitrificación se puede conseguir en el mismo reactor utilizado para el tratamiento de la materia orgánica carbonácea o bien en un reactor separado en un reactor separado de cultivo en suspensión dispuesto a continuación del proceso de lodos activados.

Cuando hay mayor presencia de nitrógeno en forma de amoníaco se requieren dos fases. En la primera fase el amoníaco se convierte por vía aerobia en nitratos NO_3 (Nitrificación), en la segunda fase los nitratos se convierten en nitrógeno gas (desnitrificación) que se libera a la atmósfera. Si el nitrógeno en su mayor proporción se encuentra en el agua residual en forma de nitrato, solo se necesita la fase de desnitrificación.

El Gráfico 64 muestra un detalle de una planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados con fases separadas para la oxidación del carbono y la nitrificación.

**Gráfico 64. PTAR tratamiento fases separadas de carbono y nitrificación-
Marlborough, Mass**

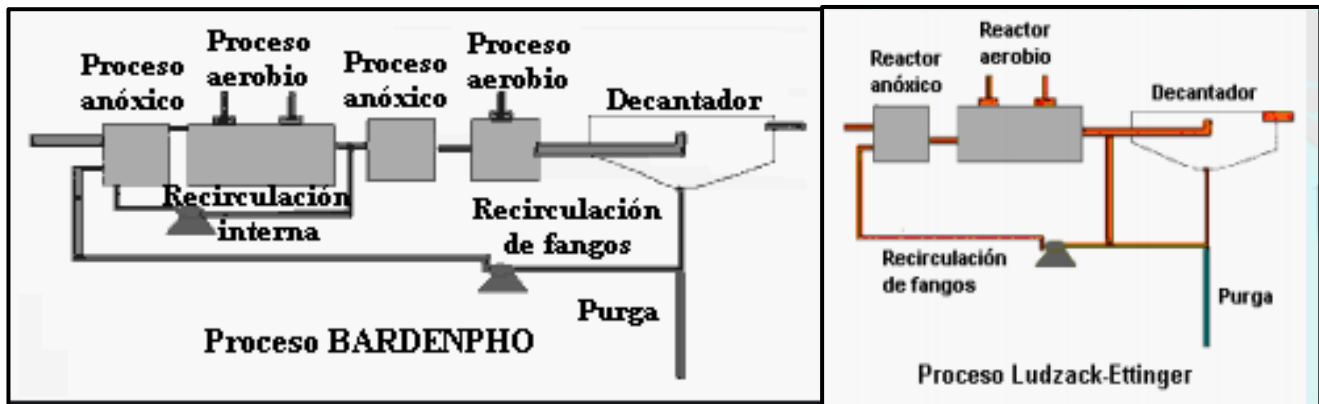


Fuente: Metcalf Eddy. Ingeniería Sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. pág. 791

Existen variantes en los procesos de nitrificación- desnitrificación con respecto al tratamiento biológico, que dependerán, entre otros, de los contenidos y forma presente del nitrógeno, que los especialistas en aguas residuales presentan para realizar el tratamiento de las aguas residuales hasta esta fase, muchos de los cuales han sido objeto de patente, asegurando que el nitrógeno se encontrará en niveles que no permitirán afectaciones en el tratamiento o en el uso que se quiera realizar del efluente tratado en complemento con las otras unidades que se instalen del tratamiento avanzado (Ver SBR).

El Gráfico 65 muestra detalles de algunos de estos sistemas como son el sistema Bardenpho y sistema Ludzack- Ettinger.

Gráfico 65. Esquemas eliminación Nitrógeno



Fuente: D.A. Aznar Jiménez. Dpto. C. e I. de Materiales e I. Química Universidad Carlos III- Madrid. Tomado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/ingenieria-ambiental/material-clase/MC-F-217.pdf>.

Remoción de sólidos suspendidos residuales

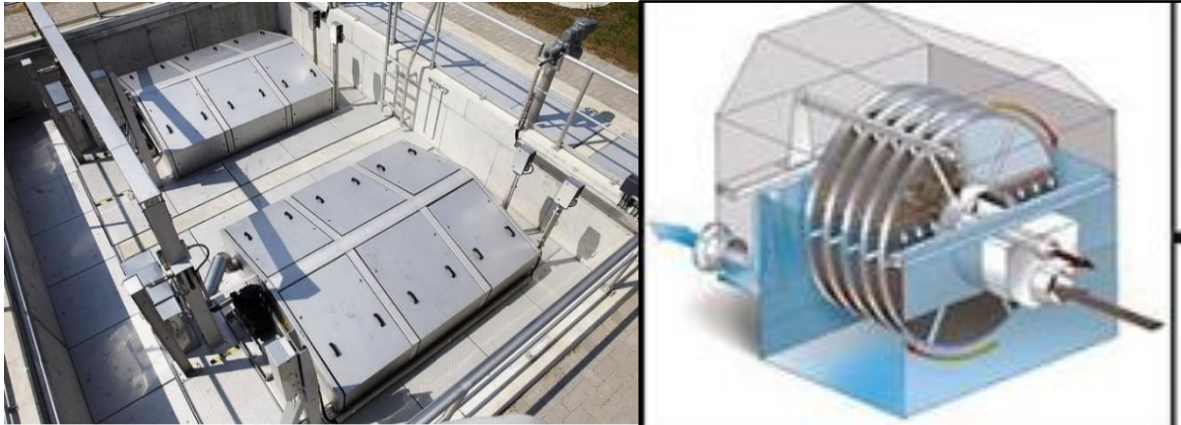
Dado que pueden presentarse en el efluente del tratamiento secundario sólidos suspendidos y material particulado que se escapan del sedimentador secundario por sobrecargas o problemas de operación en el sedimentador, es necesario garantizar que en el tratamiento avanzado no ingresen en niveles que puedan dañar (obstruir) las membranas de esos sistemas. Al respecto es necesario instalar sistemas de filtración o micro tamizado que puedan retener ese material y facilitar el ingreso del efluente al tratamiento avanzado.

En el Gráfico 66 se muestra un detalle de un micro tamizado para retención de estos sólidos, en el que pueden retenerse partículas hasta de 10 μ . Es un Tamiz de lámina libre con gran superficie filtrante, que se basa en el principio de una malla filtrante con un sistema de autolimpieza con agua a presión. El equipo cuenta con una batería de discos giratorios instalados en paralelo a lo largo de un eje horizontal. Los discos están sumergidos hasta un 60% en el agua filtrada. Cada disco lo forman varios segmentos de acero inoxidable que llevan mallas a través de las cuales el agua fluye de dentro hacia fuera. El filtrado obtenido sale por el lado frontal del equipo. Durante la filtración los discos permanecen inmóviles.

Las partículas se quedan retenidas en la malla y descenden por el efecto de la gravedad. Con el tiempo la malla se va colmatando. Esa colmatación provoca un aumento de la pérdida de carga. Cuando se alcanza la diferencia de presión máxima prefijada, se inicia el ciclo de lavado. Mientras los discos giran lentamente, unas boquillas proyectan agua contra la malla, arrastrando los sólidos a una tolva situada en el centro del equipo. El propio filtrado bombeado mediante una bomba instalada en la salida del filtro puede utilizarse como agua de lavado. La filtración

continúa durante el ciclo de lavado. Adicional a la remoción de los sólidos en suspensión, hace remoción de fósforo, DBO₅ y DQO.

Gráfico 66. Filtro de disco RoDisc®



Fuente: Huber Technology – wastewater solutions. Tomado de <https://www.huber-technology.cl/es/productos/tamizado-de-aguas/tamices-ultrafinos/huber-filtro-de-disco-rodiscr.html>

Tratamiento avanzado

En esta fase se hace la eliminación de materiales disueltos, coloidales y suspendidos que quedan aún después del tratamiento terciario, cuanto sea necesario para su ingreso al sistema de consumo doméstico directamente, o en conjunto con agua cruda para su potabilización o como reserva en tanques de almacenamiento para su posterior uso, o para su reinyección en acuíferos cuando esa opción esté disponible como recarga para posterior extracción y uso doméstico.

Según Watereuse (2015) en el caso de Estados Unidos, el propósito principal del tratamiento avanzado del agua es producir un agua con una calidad que cumpla con todas las regulaciones de reutilización como agua potable, para que sirva como fuente de suministro. Las principales preocupaciones con las aguas residuales tratadas son los patógenos y los componentes químicos⁹⁷. Las aguas residuales tratadas de una planta de tratamiento de aguas residuales tienen patógenos medibles y constituyentes de nivel de trazas. Los niveles de patógenos en el efluente secundario presentan una amenaza para la salud pública y deben reducirse sustancialmente. Muchos componentes químicos tienen valores

⁹⁷ En EU se tienen muchas estrategias de control de calidad del agua que incluyen la ley de agua limpia (Clean Water Act); la ley de agua potable segura (Safe Drinking Water Act); normativas Estatales como en Texas, y California, entre otros; límites máximo de contaminantes (MCL) establecidos por la EPA (Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos), entidad que también hace periódicamente una selección de Candidatos contaminantes (CCL) para gestión del riesgo, etc.

regulados [por ejemplo, el Nivel Máximo de Contaminante (MCL) para nitrato] que debe cumplirse a través del proceso de tratamiento avanzado. En la mayoría de los casos, se ha demostrado que los niveles de trazas de componentes químicos no regulados, que generalmente se encuentran en el nivel $\mu\text{g} / \text{l}$ o ng / l , están por debajo de los niveles de importancia para la salud; Sin embargo, existen razones para proporcionar un tratamiento adicional para constituyentes químicos, para aumentar la confianza pública en el reúso para el consumo potable directo y como precaución contra componentes desconocidos en las aguas residuales tratadas.

La protección de la salud pública requiere que los componentes microbiológicos y químicos de las aguas residuales se eliminen en la medida de lo posible antes de su descarga al medio ambiente o para otros usos. La eliminación completa de todos los microorganismos y productos químicos es imposible; por lo tanto, se establecen objetivos para limitar la exposición humana de agentes específicos identificados a concentraciones que no son perjudiciales para la salud humana. Las concentraciones máximas permitidas de estos agentes se establecen como estándares. En los Estados Unidos, estos estándares para el agua potable se conocen como niveles máximos de contaminantes (MCL) para productos químicos y reducciones logarítmicas para patógenos y bacterias indicadoras fecales.

Como referente de una técnica de tratamiento se presenta el realizado en EU en Wichita Falls - Texas, donde se hace un tratamiento de reúso como emergencia. El tratamiento desarrollado consiste en que el efluente clorinado del tratamiento secundario pasa a un tratamiento avanzado que contiene una microfiltración más una ósmosis inversa y una desinfección UV. Ese efluente es mezclado en una proporción 50/50 con agua cruda de otras fuentes antes de enviarse a la planta de potabilización de la ciudad que asegura el tratamiento para consumo humano.

Microfiltración (MF)/ Ultrafiltración (UF)

La microfiltración y la Ultrafiltración son procesos de filtración con un filtro de tamaño micrométrico (μm). Las membranas de microfiltración tienen un tamaño de poro de 0,1-10 μm , suficiente para retener toda clase de bacterias, turbidez, macromoléculas y coloides, entre otros. Cuando se requiere retener otros contaminantes de menor diámetro (partículas de 0.04 – 0.1 μm) se utiliza la ultrafiltración. Se utilizan como pretratamiento del agua para nanofiltración y la ósmosis inversa, entre otros. Pueden ser a presión atmosférica o con un recipiente a cierta presión (máximo 25 psi), pero usualmente trabajan a bajas presiones.

El tipo de membrana utilizada para estos procesos, son las membranas microporosas. Estas membranas tienen como función impedir, por exclusión, el

paso a través de la membrana de aquellos contaminantes de mayor tamaño que el mayor diámetro de poro de la membrana, siendo parcialmente rechazadas aquellas sustancias cuyo tamaño está comprendido entre el mayor y el menor de los diámetros del poro. En este tipo de membranas la fuerza impulsora responsable del flujo de permeado a través de la membrana es una diferencia de presión.

Dependiendo del tipo de contaminantes que se requiera remover se utilizará uno u otro. La microfiltración es capaz de separar pequeñas partículas y la ultrafiltración macromoléculas.

La microfiltración utiliza valores de diferencia de presión transmembrana comprendidos en el intervalo 100 – 500 kPa. Se utilizan membranas microporosas del tipo filtro profundo dispuestas en cartuchos, que se instalan en línea y del tipo tamiz, que se disponen en diferentes configuraciones y que operan en la forma filtración tangencial.

Las membranas más utilizadas en UF son las anisótropas⁹⁸ de tipo Loeb - Sourijan, donde una delgada capa de poros de pequeño diámetro se encuentra unida, sin discontinuidad, a otra capa más gruesa y microporosa. Los materiales habitualmente empleados en la fabricación de este tipo de membranas son: poliacrilonitrilo, polímeros de polivinilcloruro/poliacrilonitrilo, polisulfonas, polivinilideno fluoruro, poliamidas aromáticas, acetato de celulosa y materiales cerámicos (óxidos de titanio, aluminio y silicio). Su utilización está asociada a la eliminación de sustancias orgánicas y en la eliminación de trihalometanos del agua.

Ósmosis inversa (OI)⁹⁹

Se utiliza para eliminar sales residuales y sólidos coloidales y disueltos, incluyendo trazas orgánicas, mediante exclusión por tamaño y solución/difusión. El rango de tamaño de poro de membrana típico es de 0,0001 a 0,002 μm .

La característica principal de este proceso es que con las membranas de ósmosis inversa el rechazo de solutos no ocurre mediante filtración, sino que el mecanismo de transporte característico es el de disolución-difusión a través de la membrana. El proceso de separación se debe a la diferente solubilidad y

⁹⁸ Las membranas anisótropas son estructuras laminares o tubulares donde el tamaño de poro, la porosidad o la composición de la membrana cambia a lo largo de su espesor

⁹⁹ INDITEX (2015) Filtración en Membrana y Ósmosis Inversa Serie: Tratamientos Terciarios. Filtración en Membrana y Ósmosis Inversa. Serie: Tratamientos Terciarios. Universidad de Coruña- Inditex. Tomado de <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Filtraci%C3%B3n+en+membrana+%C3%B3smosis+inversa.pdf/c6e09095-3730-c07e-42e8-3f9db4f7e28b>

difusividad en la membrana de los distintos componentes de la solución acuosa y por tanto se trata de un proceso fisicoquímico, ya que las interacciones que existen entre las moléculas de agua, la membrana y los solutos son las responsables de la separación. En consecuencia, estos procesos pueden llevar a la remoción de sales durezas, patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores (SPPs), compuestos orgánicos sintéticos (COS), pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy en día.

La mayoría de los gases disueltos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2), y algunos pesticidas pasan a través de las membranas, Sin embargo, la tecnología de las membranas puede utilizarse para tratar un mayor número de contaminantes del agua potable, más que ninguna otra tecnología de tratamiento (AWWA, 1996)¹⁰⁰.

El proceso de ósmosis inversa consiste en generar, mediante una membrana permeable al agua, una solución acuosa con bajo contenido en sal a partir de otra con alto contenido en sal. Es la tecnología utilizada para producir agua desalada a partir de agua de mar. Igual que en MF y UF, la causa que genera la fuerza impulsora para lograr la separación de la sal es una diferencia de presión transmembrana. Sin embargo, en la OI el proceso de separación se debe a la diferente solubilidad y difusividad en la membrana de los componentes de la solución acuosa. Los valores de operación de la diferencia de presión transmembrana y concentración de la solución son 7 – 70 bar y 200 – 30.000 ppm, respectivamente.

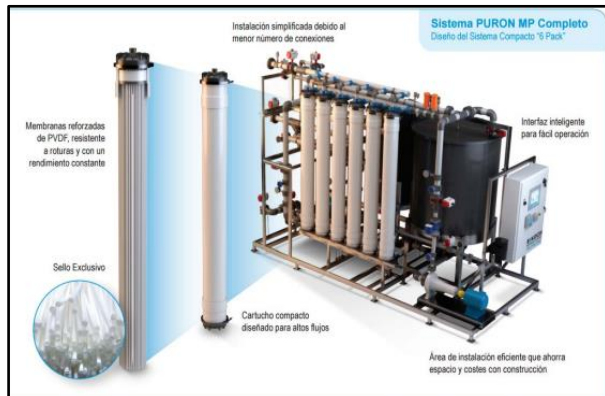
Desinfección UV

Este sistema fue referido en el numeral 0 en el ítem de desinfección, con la ventaja que, en esta etapa del proceso, no habrá interferencia por presencia de sólidos en los tubos (no hay sólidos) y será mucho más eficiente la desinfección.

El Gráfico 67 y Gráfico 68 presentan detalles de configuración de estos sistemas de Tratamiento Avanzado.

¹⁰⁰ AWWA, LdE, & WRC. (1996). Water Treatment Membrane Processes. (American Water Works Association, Lyonnaise des Eaux, & Water Research Commission of South Africa, Eds.) (Vol. 8). McGraw-Hill.

Gráfico 67. Sistemas de tratamiento avanzado Microfiltración – Osmosis inversa



Sistema PURON MP completo (microfiltración).
KMS



United Envirotech. Módulos de ósmosis inversa

Fuente: INDITEX (2015)

Gráfico 68. Sistema desinfección UV



Fuente: Newland Entech co. Ltd- tomado de <https://www.environmental-expert.com/products/closed-uv-disinfection-system-649437>

Tanque buffer o de almacenamiento temporal.

Este es un tanque de almacenamiento temporal para el agua tratada, que proporciona una contención de seguridad del agua residual tratada con la capacidad volumétrica suficiente para retenerla un período de tiempo específico (Tchobanoglous et al., 2011:101). Se busca garantizar que la calidad del agua residual tratada cumpla con todas las normas de salud pública relacionadas con la calidad del agua o las medidas de calidad antes de ser introducidas en una planta de tratamiento de potabilización para consumo humano. El tiempo debe ser suficiente para permitir la continuidad del flujo y la medición y reporte de componentes específicos. Esto no significa que todos los estándares regulatorios deben ser monitoreados en el tanque antes de enviarla al tratamiento de

¹⁰¹ Tchobanoglous, G.; Leverenz, H.; Nellor, M. H.; Crook, J. Direct Potable Reuse: A Path Forward. WaterReuse Research Foundation: Alexandria, VA, 2011

potabilización, sino que brinda la oportunidad de monitorear parámetros claves previamente seleccionados.

4.1.2.2. Sistema SBR (Secuencial Batch Reactor) reactores biológicos secuenciales con tratamiento terciario y tratamiento adicional avanzado¹⁰²

Antes de implementar el tratamiento secundario con el SBR en vez de los lodos activados de aeración extendida señalado en la Técnica 1, se debe incluir el tratamiento preliminar (ver numeral 0), el tratamiento primario (ver numeral 0) y el manejo de lodos (ver numeral 0).

Como se señaló anteriormente esta técnica está referida al uso de un sistema secundario con base en el SBR referenciado en el Tratamiento secundario con base en Lodos activados, pero que debe incluir la fase anóxica para conseguir además de la degradación de la materia orgánica, la eliminación de componentes como el nitrógeno como **tratamiento terciario**. Para su buen funcionamiento el proceso SBR debe cumplir con 2 aspectos esenciales; el control del automatismo, con entrenamiento adecuado del personal y al menos uno o más reactores en paralelo para que el sistema opere adecuadamente.

La estructura del sistema SBR es muy similar a lo señalado en el numeral 0, con la modificación de las etapas que se desarrollarán las siguientes fases:

- Llenado
- Reacción
- Decantación
- Vaciado

Fase de llenado

Ingreso del efluente desde el nivel mínimo hasta el nivel máximo de diseño, que coincide con el volumen total del por batch. El tiempo de esta fase dependerá del flujo a ingresar, las condiciones de carga de diseño, el tiempo de detención y las características de sedimentabilidad de la biomasa.

La fase de llenado puede operar en algunos de los siguientes modos o combinación de modos:

¹⁰² Taersa- Tratamiento de aguas, efluentes y Reúso S.A. – Reactores Secuenciales Batch- SBR. Tomado de <https://www.taersa.com/tecnologias-procesos/tratamiento-de-efluentes/tratamiento-secundario-o-biologico/reactores-secuenciales-batch-sbr/>

Llenado estático (anaeróbico – sin aeración o mezcla): Utilizado para producir ácidos grasos volátiles y ácido fórmico, necesarios para promover la remoción biológica del fósforo. También es utilizado en el arranque de un SBR, como selector para el control del crecimiento de microorganismos filamentosos o en periodos de baja carga par ahorro de energía. Para el caso de reúso para consumo doméstico esta fase podría ser obviada, dado que el fósforo puede ser removido en la fase de tratamiento avanzado a través de las membranas.

Llenado con mezcla (Anóxico sin aeración, pero con mezcla): utilizado para promover la desnitrificación biológica y control de microorganismos filamentosos.

Llenado aeróbico (óxico- con aeración y mezcla): Utilizado para reducir la carga orgánica antes de la fase de reacción y promover la remoción biológica de fósforo, si esta fase está precedida por una fase de llenado estático. La aeración puede lograrse mediante la mayoría de los sistemas de aeración tradicionales incluyendo difusores, mecánicos y jet, entre otros.

Fase de reacción

Esta fase comienza cuando el reactor está completamente lleno en la etapa anterior (Fase de llenado). Una vez completada esta fase, el efluente es derivado a otro reactor para completar con el ciclo.

La fase de reacción continua hasta lograr la completa degradación de la carga orgánico (DBO₅). De ser necesario también podría llegar a completarse los procesos de nitrificación y/o remoción de fósforo.

Durante esta fase, no hay ingreso de fluente al reactor y la aeración y mezcla pueden ser continuos o intermitentes, según sea necesario. El propósito de esta aeración y mezcla es completar la degradación de la DBO, promover la nitrificación y retención biológica de fósforo (si hay llenado estático). El objetivo de no airear en esta fase está relacionado con favorecer la desnitrificación.

En esta fase como se mencionó, no ingresa carga alguna, debido a que el efluente que ingresa al SBR fue derivado a otro reactor, por esta razón el OD se incrementa conforme transcurre el tiempo de esta fase.

Fase de decantación

Durante esta Fase, tanto la aeración como la mezcla se finalizan. Los flocs formados por la biomasa (lodo) que degrada la materia orgánica se separan

mediante la gravedad y se generan así dos corrientes: una de lodos decantados en el fondo y una de líquido sobrenadante. Si los sólidos no decantan y se compacta adecuadamente, algunos de ellos pueden escapar del reactor durante la fase de vaciado.

Este sistema en comparación con un lodo activado convencional genera un sobrenadante de mejor calidad, debido a que las condiciones de clarificación son ideales, ya que no hay ingreso continuo de flujo al reactor.

Fase de Vaciado/Purga

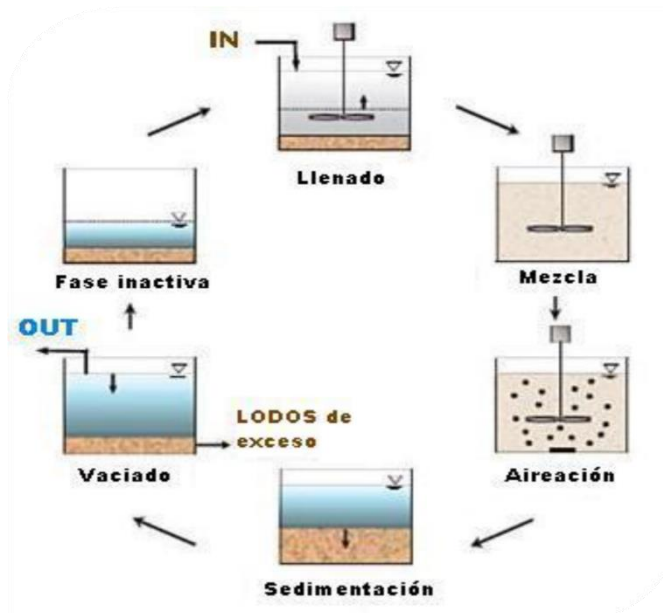
En esta Fase el líquido clarificado y tratado es vaciado del reactor SBR. Esto puede llevarse a cabo mediante tuberías fijas a determinado nivel dentro del reactor o mediante vertederos regulables. Cuando el nivel líquido llega al mínimo nivel, la fase de vaciado finaliza.

Los vertederos regulables o flotantes mantienen los orificios de salida levemente por debajo del nivel de líquido para evitar fuga de espumas o flotantes durante esta etapa. Comúnmente el 25% del volumen de un SBR se decanta en esta fase. Esto permite mantener la biomasa dentro del reactor para el próximo ciclo. Eventualmente las purgas de lodo en exceso se realizan desde el fondo del reactor.

En muchos casos, existe una quinta fase de "espera" o "stand by" en donde transcurre un tiempo tal que permite al SBR ser incorporado dentro de un nuevo ciclo. Es decir, es un tiempo de espera para completar el ciclo batch mientras otro reactor completa su fase de llenado o completa su fase de vaciado/purga.

En el Gráfico 69 se muestra el esquema de funcionamiento del SBR.

Gráfico 69. Esquema funcionamiento SBR



Fuente: propuesta técnica para recuperación de la planta de tratamiento de aguas residuales-UNAM¹⁰³

Complemento del Tratamiento terciario

Desinfección

Al igual que lo descrito el numeral 4.1.2.1, en esta fase se incluye la desinfección como ya se especificó en el numeral 0 Tratamiento terciario.

Remoción de sólidos suspendidos residuales

Al igual que en el numeral 4.1.2.1 Sistema de lodos activados de aeración extendida con tratamiento terciario y tratamiento adicional avanzado y debido a que los sólidos suspendidos y material particulado que se escapan del SBR, se incluye un micro tamiz para retención de estos sólidos, en el que pueden retenerse partículas hasta de 10 μ (ver numeral 0 en lo relacionado con Remoción de sólidos suspendidos residuales).

¹⁰³ Guadalupe González Pérez. UNAM Posgrado- propuesta técnica para recuperación de la planta de tratamiento de aguas residuales de la facultad de ciencias políticas y sociales de la UNAM. Tesina que para obtener el título de especialista en ingeniería ambiental. México 2013.

Este efluente si en algún momento va a ser vertido total o parcialmente, puede cumplir con lo establecido en la resolución 631 de 2015 del MADS sobre vertimientos.

Tratamiento avanzado

Básicamente se utilizarían los tratamientos relacionados en el numeral 4.1.2.1 en cuanto al Tratamiento avanzado.

4.1.2.3. Sistema MBR ¹⁰⁴ ¹⁰⁵ (reactores biológicos de membrana) con tratamiento terciario y tratamiento adicional avanzado

Antes de implementar el tratamiento secundario con el MBR en vez de los lodos activados de aeración extendida señalado en el numeral 4.1.2.1, o del SBR señalado en el numeral 4.1.2.2, se debe incluir el Tratamiento preliminar, Tratamiento primario y el Tratamiento, evacuación y disposición de lodos.

Al igual que lo señalado en la Técnicas anteriores, este modelo está referido al uso de un sistema secundario con base en Reactores biológicos de Membrana (MBR) que combinan en una misma fase los procesos biológicos y la tecnología de membranas, por lo tanto, es un tratamiento de depuración de lodos activos donde el decantador secundario es sustituido por un sistema de membranas.

Los MBR están compuestos por dos partes principales:

- La unidad biológica responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual.
- El módulo de la membrana encargado de llevar a cabo la separación física del agua con los contaminantes

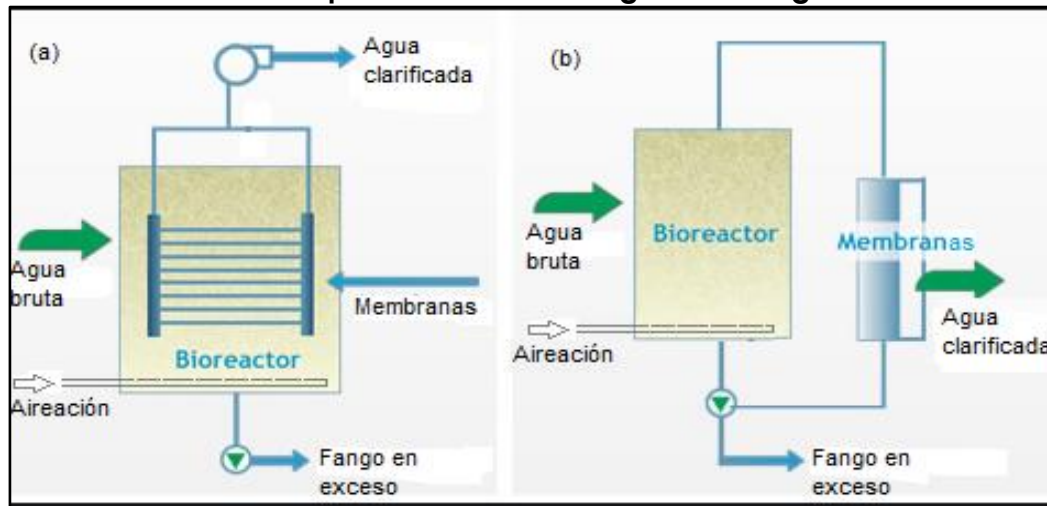
Este módulo de la membrana, según su configuración, puede ser de dos tipos:

- **Sumergido:** las membranas se sitúan dentro del reactor biológico.
- **Externo:** el contenido de reactor biológico se bombea hacia el módulo de membranas que se ubica a continuación. El Gráfico 70 muestra un detalle de la configuración del tratamiento según la ubicación de la membrana.

¹⁰⁴ AEDyR – Asociación Española de Desalación y Reúso – La tecnología de reutilización de agua más compacta: Reactores Biológicos de Membranas (MBR). Post junio 18 de 2019.- Tomado de <https://www.aedyr.com/es/blog/tecnologia-reutilizacion-agua-compacta-reactores-biologicos-membranas-mbr>

¹⁰⁵ Aguas residuales industriales, Reactor de membranas MBR. Abril 19 de 2017. Tomado de <http://aguasindustriales.es/category/reactor-de-membranas-mbr/>

Gráfico 70. Tipo de membrana según su configuración



a) MBR membrana sumergida

b) MBR membrana externa.

Fuente: GEDAR – Soluciones para Tratamiento de Aguas¹⁰⁶

En cuanto a los tipos de membranas que se utilizan en los MBR son de Microfiltración o de Ultrafiltración. Este tipo de membranas no retienen sales, nitrógeno, fósforo ni la mayoría de los contaminantes emergentes como lo hacen otras tecnologías de membranas, por lo que posteriormente puede necesitarse también un tratamiento de membranas de ósmosis inversa o de electrodialisis para proporcionar un tratamiento complementario de desinfección de barrera, antes del tratamiento de desinfección de mantenimiento, necesario para desactivar o destruir los microorganismos patógenos.

Los materiales de las membranas en los MBR más utilizados son poliméricos o cerámicos. Las membranas se colocan en módulos que pueden tener diferentes configuraciones siendo las más habituales membranas de placa plana, membranas de fibra hueca y membranas tubulares.

Entre las ventajas asociadas a este sistema se enuncian:

- Fácil operación y mantenimiento
- Rápida implantación e integración con sistemas existentes
- Reduce o elimina la desinfección
- Baja presión transmembrana (TMP) de operación
- Cumple con los límites más estrictos para materia orgánica, SS y nutrientes
- La vida de servicio útil de la membrana puede ser mayor a 10 años

¹⁰⁶ GEDAR – Soluciones para Tratamiento de Aguas - Bioreactor de membrana MBR. Tomado de <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/bioreactor-membrana-mbr.htm>

- Ultra compacto, bajo espacio de implantación
- Reduce producción de lodos y costo asociado de deshidratación más gestión
- Eliminación de los problemas inherentes a la decantación del lodo.
- Efluente de altísima calidad, apta para reutilización

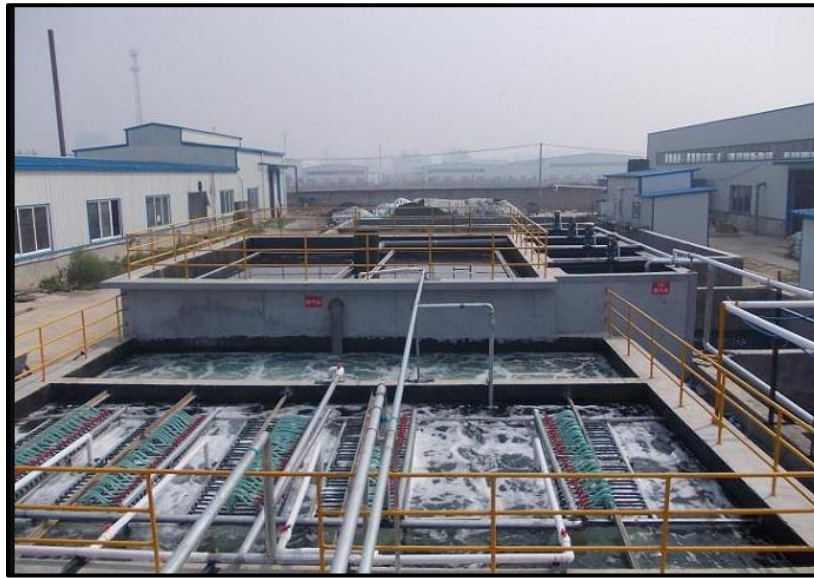
Una ventaja importante del MBR es que los sólidos del lodo y biomasa son totalmente retenidos en el reactor. Esto significa que el tiempo de retención de sólidos (SRT) en el reactor se puede controlar completamente por separado del tiempo de retención hidráulico (TRH). Esto es diferente en comparación con los lodos activados en donde los "flóculos" que componen la biomasa tienen que crecer en tamaño hasta el punto donde puedan sedimentar en el clarificador secundario. En ese caso el TRH y SRT van acoplados, ya que el tamaño del floculo y su sedimentabilidad está ligada al TRH.

Adicionalmente el tiempo de retención de los sólidos (SRT) tiende a proporcionar un mejor tratamiento biológico total. Esta condición favorece el desarrollo de los microorganismos de crecimiento más lento, específicamente nitrificantes. Los MBR entonces son especialmente eficaces en la eliminación del N (nitrificación).

El MBR puede funcionar a concentraciones de SSVLM (biomasa activa) entre 8.000 a 15.000 mg/l, mientras que los sistemas de lodos activados convencionales funcionan con concentraciones en el rango de 2.000 a 5.000 mg/l; sin embargo, esto resulta en un mayor tiempo de retención de sólidos (SRT) o edad del lodo y un espacio mucho menor correspondiente al reactor biológico aireado, eliminando la necesidad de un decantador clarificador o flotador final. El SRT más alto del sistema MBR conduce a una mejor eliminación de materia orgánica, amoníaco y nitrógeno que los sistemas de lodos activados convencionales. Además, la concentración de sólidos suspendidos (SST) total descargada en el proceso es insignificante o depreciable, pudiendo además alcanzar muy bajas concentraciones de fósforo efluente.

El Gráfico 71 muestra la panorámica de una de las plantas con MBR de AEMA (Agua, Energía y Medio Ambiente Servicios Integrales S.L.) Empresa Española que realiza suministros de ese tipo en ese país.

Gráfico 71. sistema SBR instalado por AEMA en España



Fuente: Aguas residuales industriales¹⁰⁷

Con la implementación de este sistema MBR, no se requiere adicionar unidades de sistema terciario y se podría avanzar a la fase de tratamiento avanzado.

Algunos de las empresas que realizan suministros de sistemas de tratamiento, recomiendan que, como suplencia a las membranas, por la necesidad de mantener el tratamiento continuo y por problemas en las membranas (obstrucción, mantenimiento) se instale un tamiz o filtro de 100 μ que permita mantener el efluente en calidad similar a la del MBR mientras se soluciona el impase en las membranas.

En esta etapa del proceso si el efluente en algún momento va a ser vertido total o parcialmente, puede cumplir con lo establecido en la resolución 631 de 2015 del MADS sobre vertimientos.

4.1.2.4. Tratamiento Avanzado

Considerando que mediante la implementación del MBR los efluentes salen del sistema con calidad de efluente después de un micro filtrado o ultrafiltrado, el tratamiento avanzado se remitiría a la instalación de una osmosis inversa, a una desinfección UV y al almacenamiento temporal en el tanque Buffer, como se

¹⁰⁷ Aguas residuales industriales. Depuración de aguas residuales industriales mediante tecnología MBR. febrero 13, 2014. Tomado de <http://aguasindustriales.es/category/reactor-de-membranas-mbr/>

especificaron con anterioridad para las técnicas 1 y 2 (ver numeral 0 en lo relacionado con osmosis inversa, desinfección UV y tanque Buffer).

4.1.2.5. Requisitos de implementación

Teniendo en cuenta que las tecnologías implementadas para el reúso de agua para consumo doméstico son similares a las que se han referenciado en el capítulo de reúso agrícola, los mismos tipos de empresas pueden hacer posible el suministro de estos sistemas. La condición a tener en cuenta es que se deben introducir mejoras en el terciario mediante el uso de equipos especificados de microtamizado y filtración con membrana, que en el mercado mundial se pueden adquirir dada la amplia oferta de dichos suministros.

Las tecnologías de equipamiento de tratamientos terciarios y avanzados, que no son tan corrientes en la actualidad en nuestro medio, deben negociarse con los proveedores de los sistemas de tratamiento, para garantizar no solamente el suministro de dichos equipos en el país, sino también el suministro de repuestos y la atención en su mantenimiento y reparación, en caso de daños y deterioro. Esto es importante y debe ser considerado en el proceso de licitación para asegurar que se va a contar con equipamiento con casas representantes de la tecnología que se adquiere, que de la asistencia en el momento que se requiera. También en esa fase debe quedar claro en los pliegos el stock de repuestos que se debe suministrar desde el inicio de operaciones para contar en la PTAR con materiales de reparación y equipos de repuestos básicas para operar por lo menos durante el primer año, mientras se genera el presupuesto de mantenimiento del sistema para el siguiente año.

Por otra parte, idealmente debe quedar en el contrato, que mientras dura el arranque y estabilización del sistema, el Contratista operará el sistema hasta que el Contratante cuente con el personal a cargo de la operación debidamente capacitado. De igual manera que será responsable de los suministros de insumos y laboratorio por un periodo de tiempo que permita al contratante hacerse al inventario de estos materiales y del personal de monitoreo y análisis, para así mantener el sistema operando, garantizando su buen desempeño. Sin embargo, incluir estas condiciones genera un costo que debe ser asegurado por el contratante.

El suministro de estos sistemas debe estar acompañado de los fabricantes de equipos en capacitación de su manejo, operación y mantenimiento.

Cada proyecto conlleva sus necesidades de áreas que diferirán básicamente en la fase de tratamiento secundario y terciario, ya que para el tratamiento avanzado son significativamente similares para cualquier técnica previa implementada. Estos tratamientos avanzados son mucho menores en área a los ocupados por los sistemas biológicos incorporados hasta el tratamiento terciario. En el caso hipotético que el país avance a la implementación de estas tecnologías se trabajaría puntualmente dependiendo de las poblaciones o Empresas que se vayan a incorporar al proceso y de los sistemas que tengan ya operando, para definir las necesidades adicionales de área para completar lo existente.

El país cuenta con la experiencia en tratamiento de aguas residuales, existe personal profesional y técnico que con capacitación en la fase de puesta en marcha de los sistemas podrá acompañar los procesos requeridos para la operación y mantenimiento de los sistemas instalados.

Si se maneja otra figura de contratación (bajo la modalidad de BOMT y O&M primordialmente) las Empresas que vayan a desarrollar los Proyectos, tendrán personal con experiencia del manejo de estos sistemas entrenados en operaciones de similar naturaleza y podrán incorporar en el país el personal adicional que requieran, sin mayor problema para adelantar el manejo y operación de los sistemas construidos.

Igualmente es necesario tener en cuenta que se debe asegurar la operación y mantenimiento del sistema, así como crear un modelo de negocio para el uso y aprovechamiento de las aguas reusadas.

En general el periodo de diseño de estas instalaciones es de 25 años, según lo establece el artículo 40 de la Resolución 330 de 2017 de MVCT, sin embargo, se debe considerar lo establecido en el parágrafo del mismo artículo, en cuanto a proyectos especiales para agua y saneamiento básico, como los provenientes de alianzas público – privadas, que señalan que se podrá aceptar un periodo de diseño mayor, siempre y cuando se efectúen los análisis técnicos y económicos que lo justifiquen.

4.1.2.6. Costos

Los costos que requiere este sistema dependerán de la población objetivo, caudal, tipo y calidad del vertimiento y de las regulaciones establecidas al respecto. También dependerán del tipo de instalación adicional que se vaya a implementar si ya se tienen tratamientos en funcionamiento.

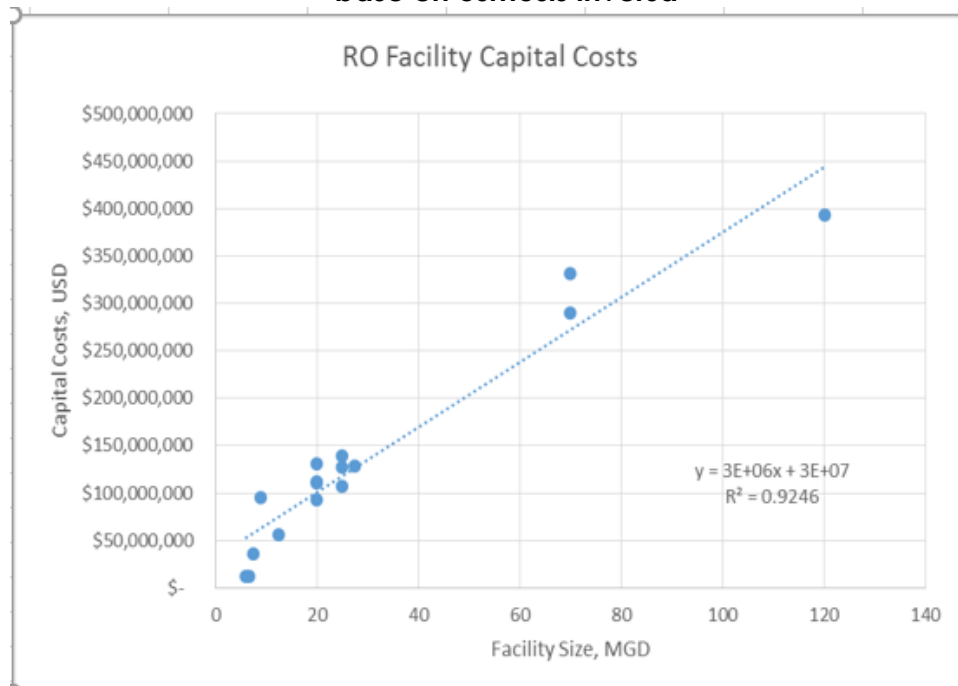
De la misma forma los costos de operación y mantenimiento dependerán en cada caso particular del equipamiento suministrado, de la calidad del vertimiento a tratar y de la calidad del tratamiento a desarrollar, en función de la normativa que se tenga en su momento al respecto.

Previamente (en la fase de reúso agrícola) se especificó una visión de costos para los dos sistemas de tratamiento recomendados, uno de los cuales (el de lodos activados de aeración extendida) tiene valores hasta su fase secundaria. Para el reúso de consumo doméstico, que no está contemplado dentro de los alcances de la normativa y de su próxima revisión, como opción de implementación, no hay una estructura de costos, la que se debería construir a partir de una normativa que permita decidir la factibilidad de su implementación y los costos asociados a cada caso.

Se presentan como referencia los costos establecidos en un estudio realizado en Nuevo México- Estados Unidos (Glenn 2017)¹⁰⁸ que proyectó dentro de la investigación desarrollada, una formulación de costos de inversión y mantenimiento de sistemas avanzados para hacer reúso directo de agua residual tratada, para poblaciones costeras áridas de tamaño pequeño y mediano con ingresos bajos o moderados. Los costos de inversión no consideraron valores de terreno, ni de tratamiento primario y secundario de aguas residuales. Se incluyeron costos de microfiltración, ósmosis inversa, desinfección mediante UV y otros relacionados con alternativas basadas en ozono, biofiltración y carbón activado biológico, que no se referenciarán en este documento. Los costos de O&M incluyeron energía, productos químicos, eliminación de residuos por fuera de las instalaciones, mantenimiento y reparación de quipos y materiales, sistemas e instrumentación, trabajos de laboratorio y monitoreo, mano de obra y contratos de servicios diversos, honorarios de consultoría, y suministros de oficina. No se incluyeron los costos de O&M de los tratamientos primarios y secundarios de la PTAR. Esos costos se establecieron con base de información de sistemas de tratamiento de tratamiento avanzado en California, Virginia, Washington, Texas, Nuevo México y Arizona, así como para instalaciones de desalinización en Texas. No se incluía información de instalaciones con capacidad inferior a 5 MGD (18.925 m³/día). El Gráfico 72 muestra la curva y ecuación asociada a la inversión y el Gráfico 73, muestra la curva y ecuación asociada a la operación y mantenimiento.

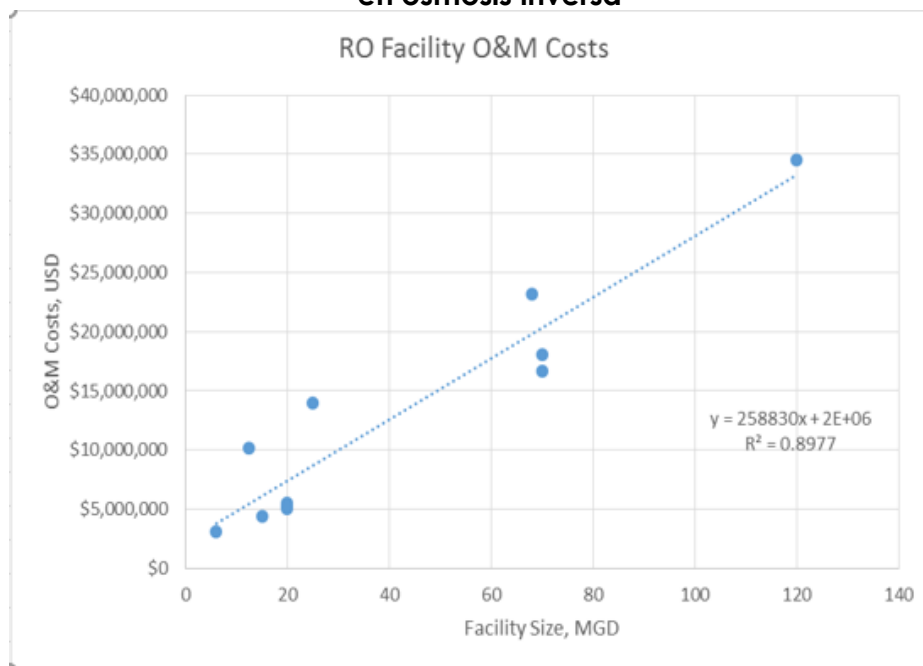
¹⁰⁸ Jason Glenn Herman- University of New Mexico, the Cost of Direct and Indirect Potable Water Reuse in a Medium Sized Inland Community, spring 5-13-2017. Tomado de https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=1034&context=arch_etds

Gráfico 72. Costos de inversión en dólares¹⁰⁹ para tratamiento avanzado con base en osmosis inversa



Fuente: Glenn 2017

Gráfico 73. Costos de O&M en dólares¹¹⁰ para tratamiento avanzado con base en osmosis inversa



Fuente: Glenn 2017

¹⁰⁹ Valores del 2014

¹¹⁰ Ídem

En el anexo 4 se presenta un cuadro resumen de las tecnologías enunciadas con todos los aspectos detallados y otros de importancia para el reúso doméstico

4.1.3. Reúso industrial

Para este caso se documentarán algunos de los tratamientos que podría ser utilizados en el país, considerando el reúso de las aguas residuales tratadas preferiblemente del mismo proceso industrial, considerando que muchas de las grandes empresas del país han desarrollado tratamientos de sus aguas residuales que les permiten cumplir con la normatividad especificada en el decreto 631 de 2015 sobre vertimientos, que podrían ser complementadas para incluirse nuevamente en algunos de sus mismos procesos industriales o en producción agrícola.

4.1.3.1. Tratamiento de aguas residuales de la producción de cerveza con destinación al reúso interno de la fábrica para servicios y refrigeración y excedentes para otros usuarios industriales o agropecuarios.

Colombia se mantiene como el tercer consumidor de cerveza en América Latina, con unos 51,4 litros por persona al año¹¹¹. Según Bavaria S.A en su informe de sostenibilidad del 2018¹¹² para producir 24'845.524 Hl cerveza al año (2.484,552,4 m³) se utilizaron 8.210.106,52 m³ de agua y se vertieron tratadas como aguas residuales 4.523.515,33 m³. Este vertimiento equivale más o menos al consumo de agua de una población de 100.000 habitantes a una tasa per cápita de aproximadamente 125 litros/día.

Aunque Bavaria S.A., ha incursionado en el proceso de reúso a partir agua residual tratada para torres de enfriamiento, servicios y aseos en dos de sus sedes principales (Tocancipá y Valle del Cauca), en un volumen de 33.106 m³, los números especificados en cuanto a vertimientos muestran el potencial que se tendría desde ese sector para lograr reusar el agua residual tratada con destinación a consumos dentro de la misma industria en otras fábricas. Esto, dado que todavía existen volúmenes importantes descargados como vertimientos que se podrían tratar y reusar en sus procesos (sin que se incluyesen como producto) y otra parte podría tener destinación a otros usos (riego urbano, agrícola, o industrial- preparación de concretos, cementeras- entre otros).

¹¹¹ El tiempo octubre 18 de 2019 - Colombia, el tercer país más tomador de cerveza de América Latina. Tomado de <https://www.eltiempo.com/economia/sectores/cuanta-cerveza-consume-cada-colombiano-al-ano-424422>

¹¹² Bavaria - Informes de Desarrollo Sostenible. Informe Desarrollo Sostenible 2018. Tomado de <https://www.bavaria.co/desarrollo-sostenible/informes-de-desarrollo-sostenible-bavaria>

Actualmente en la industria Cervecera se tienen tratamientos de agua residual que consideran en su filosofía cumplir con lo establecido en el Decreto 631 de 2015, sobre vertimientos y que son unidades básicas para utilizar como parte de los tratamientos requeridos para implementar el reúso a partir de sus vertimientos tratados. Los sistemas instalados constan en general de los siguientes componentes (Biotecs 2019)¹¹³

Tratamiento Preliminar y primario

En general los tratamientos involucrados para el sector dadas las características de los efluentes han partido de realizar los siguientes pasos:

Bombeo inicial, desbaste grueso

Generalmente las aguas residuales llegan por desagües a gravedad a profundidades mayores a 1,5 metros y considerando que hay variaciones de flujo, pH, y cargas contaminantes, es necesario elevar los efluentes para desarrollar todos los trabajos de pretratamiento y tratamiento por encima del nivel piso. En este sentido se acostumbra a colocar un bombeo inicial para los caudales pico, con un set de bombas sumergibles en acero inoxidable, con guía de izamiento y malacate para su retiro del pozo para mantenimiento, reparación o reposición. Antes que el agua residual entré al pozo de bombeo se coloca un sistema de retención de partículas gruesas de limpieza manual generalmente.

Trampa de grasas/Desarenador

Estas son unidades opcionales que se pueden colocar o no dependiendo de las características del efluente, de la concentración de grasas y del efluente y su contenido de inorgánicos que se pueden generar por combinación con aguas lluvias y arrastres de arenas o de los controles en el envasado y el retiro de vidrio In situ y no en la PTAR.

Tamizado fino

Se utilizan tamices estáticos o rotatorios con malla entre 1 y 5 mm. Se diseñaría par el caudal máximo. El Gráfico 74 muestra detalles de los sistemas a incorporar.

¹¹³ Desarrollado con base en experiencia propia de los profesionales de la Consultoría e Información suministrada por BIOTECS ingeniería de tratamiento de aguas- Ltda. Ingeniero Oscar Páez- director Colombia. Web Biotecs; <http://biotecs.com.br>

Gráfico 74. Tamices de malla fina.



Tamiz Estático- tomado de http://www.jumapac.com/72_planta_dm_erino.html



Tamiz rotatorio – tomado de https://wamgroup.com.ar/getattachment/ebf2f27c-cf5d-4a7a-a3a8-4525fbe37bc0/SGR_1.aspx?width=1800

Tanque de Homogenización (Ecuación) – Hidrólisis y tanque de neutralización.

Con el fin de garantizar caudales continuos y cargas constantes de alimentación a los procesos de tratamiento biológico se debe colocar tanque de homogenización de cargas y de igualación de caudales. Este es un tanque agitado para mantener la homogenización de las cargas.

Dado que el sistema que se propone llevará un tratamiento anaeróbico como fase inicial del tratamiento secundario, este tanque de homogenización servirá como control biológico y hará la hidrólisis de las cargas contaminantes que son fases previas del anaerobio para ayudar a mejorar el proceso de acetogénesis y metanogénesis. En este tanque la materia orgánica insoluble es primeramente atacada por una clase de microorganismos llamados fermentativos. Las moléculas orgánicas son solubilizadas, hidrolizadas y convertidas en ácidos orgánicos (ácidos grasos, ácido láctico, ácido fórmico y aminoácidos), etanol, hidrogeno y dióxido de carbono, que serán posteriormente llevadas al tanque de metanización del sistema anaerobio, previa corrección del pH,

La corrección del pH se hará en un tanque de neutralización a continuación del tanque de homogenización e hidrólisis y tendrá dosificación de reactivos ácidos o básicos con el fin de manejar la variación del pH debido a las descargas y en especial durante los eventos de aseo periódicos que se realizan dentro de los procesos de la cervecería. Generalmente se utiliza cal y ácido nítrico con sistemas de almacenamiento, preparación y dosificación de estos reactivos al sistema para corregir el pH.

Tratamiento secundario

Tratamiento anaerobio – Reactor de metanización

El efluente es recibido por bombeo desde el tanque de neutralización y que proveniente del tanque de Homogenización hidrólisis/acidificación, que corresponde a la primera fase del proceso biológico anaerobio, y que ya está corregido en su pH.

La metanización se hace en un reactor del tipo flujo ascendente de manto de lodos. Ese proceso de biodigestión anaerobia para la generación de gas metano, es un proceso microbiológico en que el sustrato, compuesto de materias orgánicas complejas solubles e insolubles es convertido en gas metano y dióxido de carbono.

Dentro del reactor de metanización, se desarrollan básicamente dos colonias principales de microorganismos.

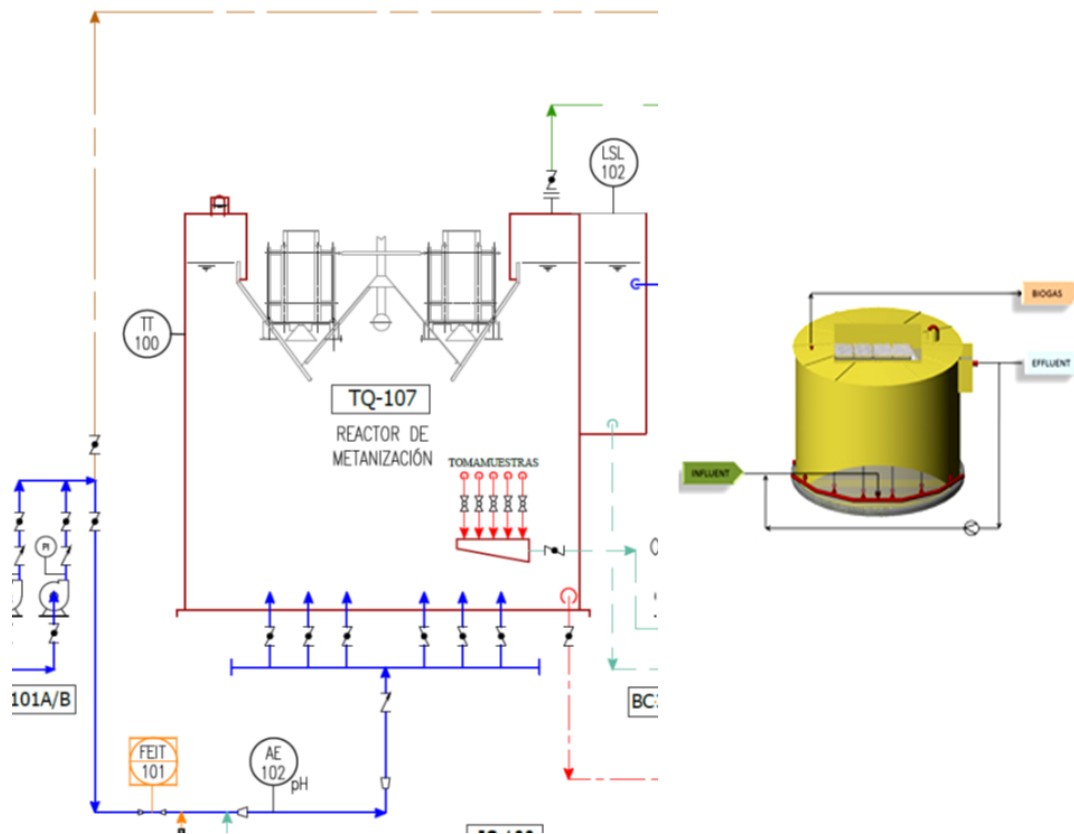
Las acetogénicas llamadas también bacteria productoras obligatorias de hidrógeno (OPHA) y las metalogénicas; las primeras se encargan de transformar los ácidos grasos provenientes del tanque de hidrólisis/acidificación a dióxido de carbono, hidrógeno y ácido acético y las segundas es decir las metanogénicas transforman estos subproductos en gas metano.

En la práctica, las aguas ingresan al reactor y atraviesan un lecho expandido de lodo metalogénico activo, parte del líquido es recirculado (para mantener una mezcla suficiente en el manto de lodo y una velocidad ascensional constante dentro del reactor) y parte sigue hacia un sistema de separación mecánico de tres fases, ubicado en la parte superior constituido de varias placas, que es proyectado para obtener una máxima eficiencia en la separación de la mezcla: lodo, gas y líquido clarificado.

El separador trifásico instalado en la tapa del reactor es finalmente complementado, a través de un diseño especial que le fue incorporado, el cual garantiza un flujo cruzado en la sección separadora de placas paralelas.

Este diseño previene al proceso contra pérdida de flóculos de lodo metanogénico, que pudieren escapar del reactor. El Gráfico 75 muestra un detalle del flujo agua, aire y lodos del tanque de metanización.

Gráfico 75. Reactor de metanización



Fuente: Biotecs ingeniería de tratamiento de aguas Ltda.- 114

El biogás es una combinación de gas metano + dióxido de carbono + sulfuro de hidrógeno (S), este último cuando hay sulfatos presentes en los desechos líquidos contaminantes. El biogás se puede utilizar como combustible principal o alternativo en calderas de vapor, calentadores, motores y turbinas de gas para generar calor / energía. En caso de no utilizarse se pueden eliminar con quemadores de biogás.

La generación de lodos es muy baja y no requiere disponerse como residuo, por cuanto su calidad como inóculo para los arranques y operación de otros reactores anaerobios son una fuente de ingreso, además que se debe mantener una reserva para eventual contingencia en caso de deterioro de la biomasa en el reactor metanogénico.

El efluente del sistema anaerobio pasa a tratamiento y pulimento en un reactor aerobio de lodos activados.

114 Ídem

En esta etapa del proceso si el efluente requiere ser vertido total o parcialmente al alcantarillado en lugar de seguir a reúso, podría realizarse el vertido con la calidad especificada en la norma.

Tratamiento aerobio – Lodos activados.

El tratamiento con lodos activados se haría mediante aeración extendida, por lo que el sistema a instalar tendrá las mismas características señaladas en el Tratamiento primario en cuanto a Aeración extendida, incluyendo el manejo de lodos (ver numeral 0).

Si se requiere realizar hacer vertimiento a cuerpo de agua total o parcialmente del efluente y debe cumplir con parámetros más exigentes a los establecidos en la resolución 631 de 2015 del MADs se debe agregar al sistema la fase de nitrificación - desnitrificación especificada en el numeral 0 en cuanto a remoción de nutrientes y la desinfección especificada en el numeral 0 de tratamiento terciario en cuanto a desinfección.

Como alternativa al tratamiento mediante lodos activados de aeración extendida para ese caso de vertimiento total o parcial con remoción de nutrientes a cuerpo se podría instalar un SBR (ver numeral 4.1.2.2).

Si el sistema de tratamiento se va a realizar solamente para reúso el sistema puede pasar desde los lodos activados a tratamiento terciario y avanzado.

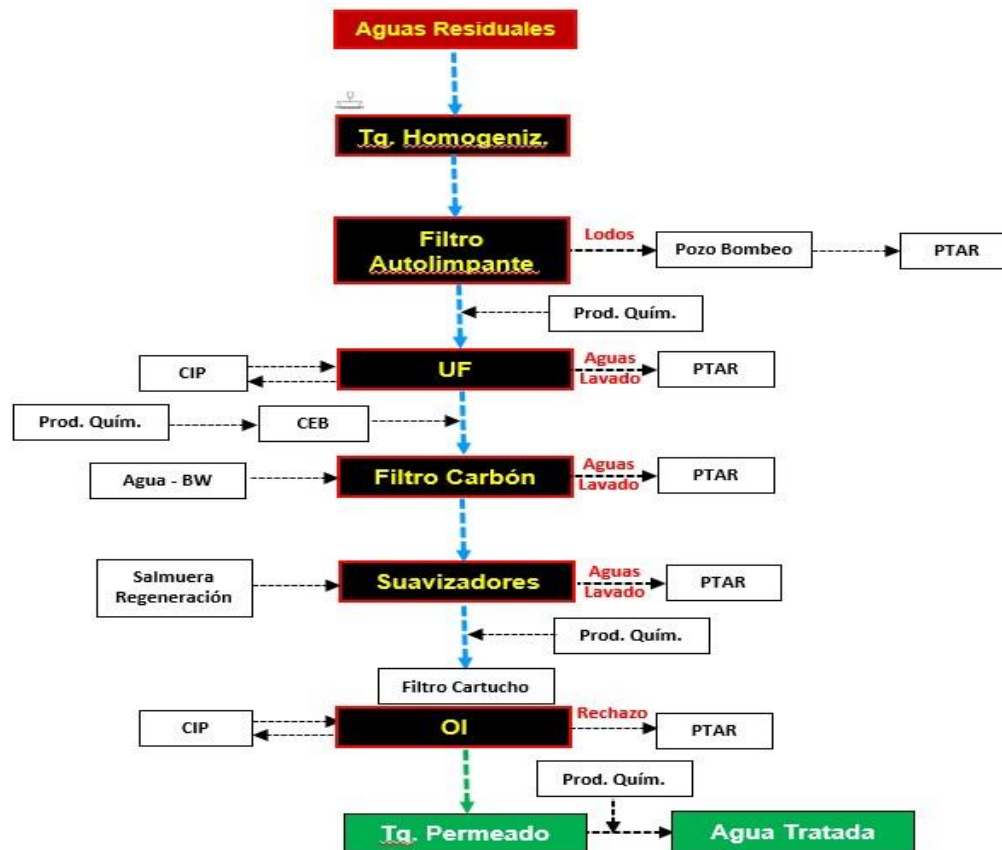
Tratamiento terciario y avanzado

En esta fase de los trabajos es esencial contar con las especificaciones de la calidad del agua requerida para el proceso industrial requerido. Generalmente en cervecería se orienta hacia sistemas de enfriamiento, servicios, generación de energía y calderas, aseos, limpieza y riego, entre otros. Generalmente los estándares dentro de las industrias en grandes empresas de este tipo y multinacionales son mucho más exigentes a los establecidos dentro de la normatividad establecida por las autoridades ambientales y de salud, por lo que la documentación recibida de las empresas que realizan estos suministros es bastante acertada al alcance de los tratamientos a incluir.

Se documenta a continuación un sistema similar a los instalados en algunas de las Empresas del sector cervecero para realizar el reúso según sus estándares establecidos.

El diagrama de bloques de el Gráfico 76 señala los procesos que se deben establecer para entregar las calidades solicitadas por una Cervecería de una multinacional para su reúso en algunos de los procesos.

Gráfico 76. Diagrama de bloques – tratamiento terciario y avanzado reúso en cervecería



Biotecs ingeniería de aguas Ltda. (Biotecs-2020)¹¹⁵.

Este desarrollo implica que a partir del recibo de aguas residuales desde el tratamiento secundario se debe construir:

- **Tanque de homogenización con mezclador:** El principal objetivo es recibir todas las aguas residuales tratadas para su posterior tratamiento terciario y avanzado.
- **Filtro Auto limpiante:** Su función básica es remover sólidos en suspensión de granulometrías de 200 μ y proteger la operación de la Ultrafiltración (UF). Los lodos serán devueltos por bombeo al sistema de deshidratación de la PTAR (Ver Gráfico 77).

¹¹⁵ BIOTECs ingeniería de tratamiento de aguas- Ltda. Ingeniero Oscar Páez- Director Colombia. <http://biotecs.com.br/>

Gráfico 77. Filtro autolimpiante



Fuente: Biotecs (2020)

Sistema Ultrafiltración (UF)

Su función es remover con alta eficiencia, los sólidos en suspensión y trabajar como escudo protector de osmosis inversa, que está instalada en seguida del proceso. Es similar a lo especificado en el numeral 0 en cuanto a microfiltración/Ultrafiltración.

Este sistema está formado por banco con módulos de membranas, del tipo HF (hollow fiber) trabajando en paralelo, con tendencia a la incrustación (Ver Gráfico 78).

Gráfico 78. Sistema Ultrafiltración - UF



Fuente: Biotecs (2020)

Limpieza Química UF

La UF recibe limpiezas periódicas (cada 3 o 4 horas durante 1 minuto) que se realizan con soluciones alcalinas (con NaOH) y ácidas (con HCl) y agua

proveniente de la Osmosis Inversa (que ya no tiene concentraciones importantes de calcio que puedan incrustarse en la membrana.

Hay otra limpieza en las membranas que se realiza cada 3 o 4 meses y puede durar de 2 a 3 horas en circuito cerrado con diferentes producto y agua limpia hasta garantizar una limpieza completa.

De esta unidad, las aguas residuales son bombeadas a un sistema de filtración de carbón activado.

Sistema Filtración

Considerando que el sistema puede tener cloro residual y que las membranas de ósmosis inversa se pueden dañar con el cloro, se instala un sistema de filtración a base de carbón activado.

Una de las alternativas es utilizar un filtro de carbón activado del tipo convencional, cilíndrico, vertical, cerrado, con boquillas montadas en uno falso fondo con todos los periféricos y accesorios complementarios (Ver Gráfico 79)

Gráfico 79. Filtro Carbón Activado



Fuente: Biotecs (2020)

Limpieza

Cuando su relleno se sature, el filtro deberá recibir un retro lavado, con agua limpia, que normalmente lleva de 20 a 30 minutos, dependiendo de las características de las aguas residuales. Esas aguas de lavado se envían a la PTAR.

Suavizadores

Dependiendo de la dureza de las aguas residuales que entrarán al sistema de ósmosis inversa, después de pasar por el filtro de carbón, podrá ser necesario la colocación de suavizadores.

Su objetivo primordial es remover la dureza de las aguas residuales y proteger la operación de ósmosis inversa y reducir o eliminar la tendencia de incrustación de sus membranas.

Los suavizadores son vasos de intercambio iónico, del tipo cilíndrico, vertical, cerrado, con boquillas instaladas en un fondo falso. El relleno utilizado en los suavizados es formado por resinas catiónicas. El Gráfico 80 muestra una foto de un sistema de suavizadores.

Gráfico 80. Suavizadores



Fuente: Biotecs (2020)

Regeneración Resinas

Periódicamente se debe hacer la regeneración de las resinas con salmuera. La jornada de limpieza y duración dependerá de las características del agua residual y de la operación del tratamiento terciario y avanzado.

Las aguas residuales ya tratadas podrán ser enviadas entonces al sistema de ósmosis inversa (OI).

Ósmosis inversa – filtros de cartucho.

Previo al ingreso a la OI se instalan unos filtros de cartucho capaces de retener mediante filtración sólidos con granulometrías superiores a 1 μ (Ver Gráfico 81).

Gráfico 81. Filtros de cartucho

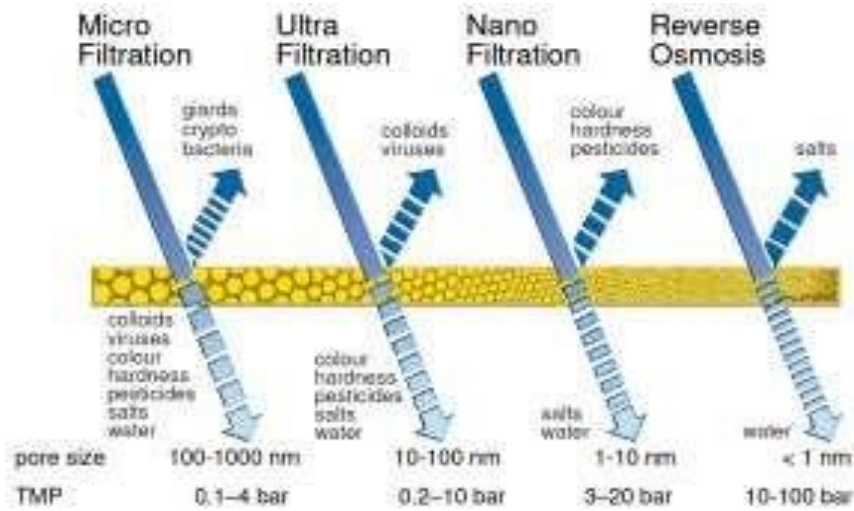


Fuente: Biotecs (2020)

Equipo Osmosis Inversa (OI)

La ósmosis inversa es un sistema de barrera física (filtración) capaz de remover, con altísima eficiencia, todas las sales y iones más grandes de 1 nm, todavía presentes en las aguas residuales, conforme se presenta en el esquema del Gráfico 82.

Gráfico 82. Sistemas de filtración



Fuente: Biotecs (2020)

Los módulos de membranas de OI trabajan a presiones más elevadas (+/- 12 hasta 30 bar), dependiendo de la aplicación, para que puedan realizarse con éxito sus operaciones (Ver Gráfico 83).

Gráfico 83. Equipo de ósmosis Inversa



Fuente: Biotecs (2020)

Rechazos

Los rechazos de la OI serán enviados para a cabeza de proceso o pasar a otro bloque de OI para hacer más recuperación de agua y concentrar más el rechazo para lograr su manejo como un residuo líquido peligroso. Esta condición se debe evaluar contra los costos que conlleva la inclusión de más unidades de OI y de los precios para disponer y concentrar los rechazos hasta el punto de manejarlos como residuos de disposición.

Dosificación Producto Químico

En las líneas de alimentación de la OI se dosificada una solución antiincrustante, para proteger los módulos de membranas contra la tendencia de incrustación.

CIP (“Clean in Place”)

El CIP, representa la limpieza química de los módulos de membranas de la OI, que se debe realizar en periodos más largos (3 a 4 meses, dependiendo de las características de las aguas residuales afluentes y de las condiciones de operación.

Esta limpieza, que puede durar de 2 a 3 horas, es hecha en circuito cerrado, por un determinado tiempo, con diferentes productos químicos y agua limpia (permeado), hasta que la limpieza se complete.

Tanque Permeado

Este es un tanque posterior a la Osmosis inversa, y su función es:

- a) Almacenar temporalmente el agua tratada (permeado)

- b) Permitir que una parte pueda ser reaprovechada en las limpiezas de las membranas.
- c) Permitir el reúso de la porción restante en la industria
- d) Permitir que el agua residual tratada pueda ser comercializada o en último caso descargada a un cuerpo de agua o al alcantarillado.

Costos

Los costos estimados de un sistema de tratamiento de las características señaladas, para un caudal de 40 m³/h, tendrían un valor de inversión del orden de 4.750.000 USD, considerando la inversión desde el recibo de las aguas residuales a la salida de la PTAR hasta su entrega total en la planta de permeado. De este valor, el tratamiento para tratamiento terciario y avanzado para el reúso indicado puede ser del orden del 37% al 40% del monto total de la inversión en tratamiento. Del caudal tratado, aproximadamente un 30% se podría reusar directamente en la planta para servicios, aseos, y destinación a sistemas de enfriamiento y refrigeración. El excedente podría ser negociado con otras industrias y para la agricultura. El tratamiento terciario y avanzado podría ser construido solamente para el 30% del caudal, que aprovecharían internamente en la planta, lo que disminuiría el valor de la inversión inicial.

En este tipo de industria los diseños de la infraestructura de tratamiento se hacen en forma modular, de manera que se puedan ampliar las unidades tratamiento en función de los incrementos de la producción y por ende de los caudales y cargas contaminantes. No obedecen a criterios de periodos de diseño.

4.1.3.2. Tratamiento de aguas residuales de la producción de lácteos con destinación al reúso interno de la fábrica para servicios aseos y otros usos externos

Esta tecnología se asocia al reúso de una industria del sector lácteo en donde se realizan procesos de envasado de leche pasteurizada y un porcentaje bajo de producción de derivados lácteos en proporción de la producción total, que es un proceso tipo de empresa de lácteos de media capacidad en nuestro país.

La información presentada por Fedegan (2020)¹¹⁶ señala que el acopio de leche para pasteurización y producción de lácteos fue en 2019 de 3.170 millones de litros. Tomando un índice de consumo de agua para ese proceso 2 m³/ton (un valor bajo de consumo de agua¹¹⁷) y haciendo una equivalencia de volumen igual a

¹¹⁶ Fedegan – Producción y acopio de leche en Colombia en litros. Febrero 12 de 2020. Tomado de <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-0>

¹¹⁷ Valor adoptado de la experiencia de los profesionales del Consorcio a cargo de la consultoría

peso, estaríamos estimando un uso de agua para producción de lácteos del orden de 3.170.000 m³ de consumo de agua al año. Esto equivale al suministro de una población de 70.000 habitantes durante un año con un consumo medio de 125 l/h/día.

El mayor uso de agua en esa industria se realiza en las labores de sanitización y servicios (calderas, refrigeración de máquinas y enfriamiento) por lo que el mayor porcentaje de reúso en la industria láctea es para el mismo reúso de las Empresas, pudiendo generar algunos excesos para el sector agrícola que por lo general está en vecindades de la misma industria láctea.

Para el reúso se utilizan generalmente procesos similares a los señalados para la industria de la Cerveza con algunas variantes.

Tratamiento preliminar primario

Se utilizarían las mismas unidades y equipos especificados en el numeral 0 para el sector Cervecerero. Se incluiría:

- Bombeo inicial, desbaste grueso.
- Tamizado fino
- Desarenado/desengrasado(inicial)
- Tanque de homogenización- hidrólisis

Estas unidades se describen en la técnica anterior (ver numeral 0 Tratamiento Preliminar y primario)

Desde el tanque de homogenización - hidrólisis (que hace la primera fase del reactor anaerobio) el efluente ecualizado y homogenizado se bombea a un tanque de flotación y retiro de alta eficiencia de grasas -DAF.

Considerando que el pH ejerce una alta influencia en los procesos que se adelantan a continuación del tanque de hidrólisis, se requiere incluir una neutralización en línea.

Sistema de neutralización

Este es un sistema constituido de tanques de almacenamiento de soda y ácido, medidor de pH y bombas de alimentación de reactivos, de acuerdo a lo requerido por el proceso.

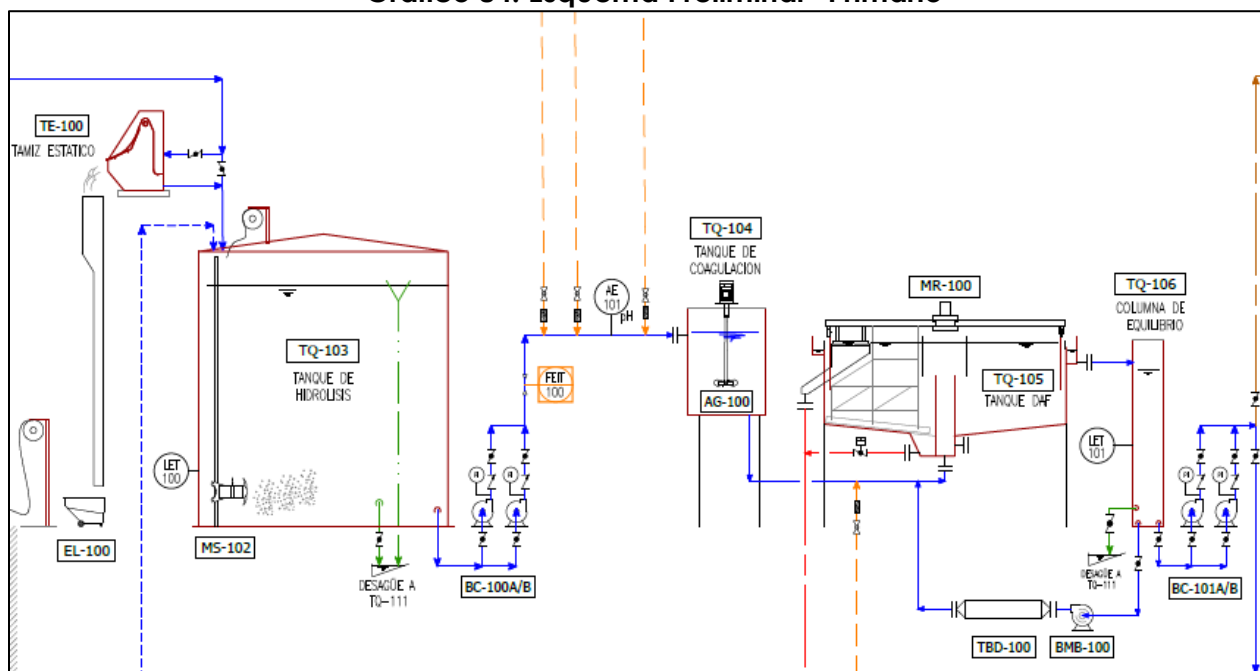
DAF

Es un sistema de flotación con aire disuelto, en donde se eliminará el mayor porcentaje de los sólidos suspendidos, así como los aceites y grasas presentes en el agua cruda.

Ese equipo cumple las dos funciones de sedimentador y flotador. Está precedido de un tanque de coagulación - floculación que sirve de acondicionador del efluente para facilitar la separación de sólidos en ese proceso del DAF. Desde esa unidad el efluente sale por la parte superior a gravedad hasta una columna de equilibrio que precede al bombeo al reactor de metanización en el tratamiento secundario.

El Gráfico 84 muestra el detalle del esquema a utilizar.

Gráfico 84. Esquema Preliminar- Primario



Fuente: Biotecs (2020)

Los sólidos, grasas y aceites separados en el flotador DAF, se retiran y son enviados a un tanque de mezcla y de ahí se transfieren al sistema de manejo de lodos que es de similar naturaleza al sistema especificado en el numeral 0

A partir de este paso, tanto el tratamiento secundario como el terciario y el avanzado utilizarán el mismo esquema de tratamiento especificado para el tratamiento de aguas residuales de cervecería (ver numerales 0 y 0).

Las variaciones en el sistema terciario y avanzado con respecto al especificado en las aguas residuales de Cervecería están asociadas a los contenidos de los componentes del agua que se deben enviar a ultrafiltración y osmosis inversa, pues determinar las características de los materiales de las membranas, porosidad y concentraciones, componentes de limpieza y tiempos de pretratamientos para conservar su funcionalidad.

En este tipo de industria los diseños de la infraestructura de tratamiento se hacen en forma modular, de manera que se puedan ampliar las unidades tratamiento en función de los incrementos de la producción y por ende de los caudales y cargas contaminantes. No obedecen a criterios de periodos de diseño.

Costos

El costo estimado de un sistema de tratamiento de las características señaladas tendría un costo de inversión del orden de 3.250.000 USD desde el recibo de las aguas residuales a la salida de la PTAR hasta su entrega total en la planta de permeado para un caudal de 18 m³/h.

4.1.3.3. Tratamiento de aguas de producción generadas en la extracción de petróleo - CORPOICA (2018)¹¹⁸

El petróleo que se extrae de la tierra sale mezclado con aguas conocidas como aguas de producción, que hacen parte de los fluidos naturales de los reservorios.

En Colombia, por cada barril de petróleo se producen, en promedio, 13 barriles de agua. Las aguas de producción son aquellas que yacen debajo de los hidrocarburos y dado el alto volumen en que están disponibles, pueden ser tratadas o reinyectadas en la misma formación, para mantener la presión de los yacimientos y aumentar el factor de recobro; ser tratadas y vertidas a cuerpos de aguas superficiales o al suelo, o ser reinyectadas en los yacimientos, como estrategia de disposición final.

Las aguas de producción de los yacimientos de la Orinoquia tienen un contenido relativamente bajo de sales y sólidos disueltos, y no poseen elementos radioactivos. Esta condición permite que, una vez que sean tratadas, puedan

¹¹⁸ Basado en la Experiencia de Ecopetrol y CORPOICA en el uso de aguas de producción tratadas en yacimientos de la Orinoquia- Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias - CORPOICA Ciencia Tecnología Agropecuaria, Mosquera (Colombia) Mayo -agosto 2018

reusarse en actividades productivas, en predios rurales que se encuentren en el área de influencia de los proyectos petroleros.

Por estas razones, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA) desarrolló una serie de trabajos de investigación, dirigidos a evaluar opciones de utilización de estas aguas de producción tratadas, para la irrigación de cultivos y pastos, así como el consumo de ganado y aves de corral. Se determinó el efecto de la aplicación de aguas de producción tratadas en diferentes componentes del ecosistema y en sistemas de producción agrícola y pecuario.

El estudio se desarrolló en el departamento del Meta, en el predio denominado Área Sostenible Agroenergética (ASA) y en el Centro de Investigación La Libertad, ubicados en los municipios de Acacias y Villavicencio, respectivamente. El agua de producción tratada que se utilizó provenía de los campos de Castilla y Apiay.

Se seleccionó un conjunto de variables de suelos, agua, cultivos y animales, que fueron monitoreadas y analizadas entre los años 2011 y 2015. Los resultados de esta investigación indican que la utilización de estas aguas y su aplicación al suelo no presentaron efectos significativos en las propiedades físicas y químicas del suelo. Tampoco se evidenciaron consecuencias significativas en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, ni en la salud de animales y cultivos.

El artículo de CORPOICA señala que las aguas asociadas a esa producción en los municipios de Acacias y Villavicencio cumplen con la normatividad ambiental vigente para su vertimiento a cuerpos de agua superficial, pero se necesitaba contar con evidencia científica sobre la posibilidad de utilizar estas aguas tratadas en otros sectores productivos, como el agrícola, el ganadero y el forestal.

Este estudio se tomará como uno de los casos a desarrollar en la fase siguiente de la consultoría, pero es importante señalar que en conclusión de los estudios que, cumpliendo con la norma legal establecida, al ser utilizadas para riego, no tuvieron efectos negativos en las propiedades físicas del suelo: densidad aparente, porosidad y estabilidad de agregados.

En cuanto a las propiedades químicas, el efecto de uso de esas aguas, aumento el contenido de Ca, Mg, K y N, así como la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. Durante los años de riego con esas aguas no se observó acumulación de metales pesados, el contenido de hidrocarburos estuvo por

debajo del rango detectable y sin diferencias entre el agua de Producción tratadas en comparación con agua de pozo que se utilizó como punto de comparación en los predios.

En los cultivos no se observó efecto negativo y se registraron mejores índices de biomasa y crecimiento en comparación con otros cultivos regionales como la caña de azúcar y el pasto elefante.

En cuanto al uso en la dieta de aves y bovinos no se encontraron asociaciones por efecto de ese consumo, ni cambios post mortem observados a nivel macro y microscópico de los tejidos que demostraran condiciones que afectaran la salud de estos animales.

Se están documentando los procesos de tratamiento de esas aguas de producción para dejarlas expresadas en el documento, aunque deben acogerse en la práctica a los estándares señalados por la literatura acerca de los tratamientos posibles a realizar.

Estos según ARPEL¹¹⁹ se pueden resumir en los siguientes tipos de tratamiento

Deshidratadores mecánicos y separadores de tres fases.

Para pozos que producen moderadas cantidades de agua, el agua y el aceite se pueden separar en separadores de tres fases. Estos separadores son útiles para la separación rutinaria de aceite, agua y gas en bajos volúmenes.

Tratadores

Para romper las emulsiones de agua y aceite mediante la utilización de diferentes métodos que incluyen la separación en reposo, la aplicación de productos químicos, la aplicación de calor, la aplicación de electricidad, la operación de dispositivos mecánicos (tanques de decantación, tanques de lavado y deshidratadores mecánicos, entre otros), o añadiendo diluyentes para reducir viscosidad

¹¹⁹ ARPEL (Asociación Regional de Empresas del petróleo y gas natural en Latinoamérica y el Caribe)- Guía ambiental para Disposición y tratamiento del agua producida. -Preparado por ALCONSULT INTERNATIONAL LTD. Tomado de <http://www.ingenieroambiental.com/4000/GUIA%2001%20-%20OK.pdf>

Remoción de Petróleo disperso

Se utilizan para minimizar el aceite en el agua que se va a descargar, reinyectar o reusar. Se utilizan tanques desnatadores, separadores de placas paralelas, celdas de flotación con gas, coalescedores, hidrociclones).

Remoción de gas disuelto

Las plantas de tratamiento de agua se clasifican en sistemas abiertos y sistemas cerrados. Los cerrados se diseñan para impedir el contacto del agua con el aire y minimizar las pérdidas del gas disuelto y el atrapamiento del aire. Los gases se mantienen en solución, si hay CO₂ y Ca, el pH es estable y se inhibe la precipitación de carbonato de calcio, se evita la oxidación del hierro disuelto y de sulfuros. El sistema se mantiene a presión, pero es más costoso. En un sistema abierto no se trata de excluir el aire, tanto así que en algunas plantas se airea para excluir gases indeseables como el H₂S. Estos sistemas permiten utilizar estanques grandes de retención quedan tiempo al agua para estabilizarse, las partículas suspendidas se depositan y las gotitas de aceite coalescen en la superficie, sin embargo, es posible que la corrosión aumente y se produzcan problemas de incrustación. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas.

Remoción de sólidos en suspensión

Estos deben removerse para evitar que tapen la formación si se reinyectan. Se usan varios tipos de filtros:

- Los de lecho graduado convencionales (arena, antracita y carbón-grafito). Operan de arriba hacia abajo. Se obstruyen fácilmente con aceite. Por lo tanto, este debe ser retirado previamente.
- Los filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo ascendente; operan de abajo hacia arriba y con alta velocidad de circulación. Se obstruye fácilmente con petróleo, por lo que éste debe ser retirado previamente.
- Los filtros de alta velocidad, lecho profundo y flujo descendente: lo mismo que los anteriores pero invertidos.
- Filtros de tierra diatomácea: Esencialmente son sílice pura, formada por plantas marinas unicelulares fosilizadas.
- Filtros cartucho. De amplia gama de materiales y tamaño de poros.

- Sedimentación: generalmente acompañadas de métodos de coagulación floculación, en proyectos grandes o donde hay presentes sólidos en suspensión muy finos. El agua de lagunas de sedimentación deberá ser filtrada luego de la sedimentación antes de su uso, para retirar cualquier sólido restante.

Para seleccionar el tipo de filtros es mejor hacer pruebas comparativas de efectividad en el lugar con filtro piloto a pequeña escala y con el agua específica que interesa.

Biocidas

Si en el agua hay bacterias presentes se deben añadir biocidas. Las que causan más problemas son las reductoras de sulfatos (SBR). El monitoreo del sistema requiere muestreo, cultivo, identificación y selección del biocida eficaz, incluyendo los de tipo químico como el cloro.

4.1.3.4. Requisitos de Implementación

Se puede afirmar que las tecnologías implementadas para el reúso de agua para consumo industrial son similares a las que se han referenciado en el capítulo de reúso para consumo doméstico, y por ello los mismos tipos de empresas que se refirieron en ese capítulo pueden hacer posible el suministro de estos sistemas. Se conoce incluso que algunas de estas Empresas ya han incursionado en suministros de sistemas de tratamiento para el reúso hacia el sector industrial en multinacionales ubicadas en países de Latinoamérica con excelente resultado.

En cuanto a lo relacionado con el sector de hidrocarburos, existen empresas especializadas en esa área que atienden directamente sus necesidades, por cuanto el desarrollo en ese sector lleva muchas décadas de funcionamiento. Ello favorece continuar con la implementación de la recirculación de las aguas de producción hacia sectores que requieren de esa agua recuperada.

Son válidas las recomendaciones señaladas en ese capítulo en cuanto a que se deben negociar con los proveedores de los sistemas de tratamiento, no solamente el suministro de equipos utilizados para los tratamientos que no son de fabricación en el país, en especial los de tratamiento terciario y avanzado sino también el suministro de repuestos y la atención en su mantenimiento y reparación, en caso de daños y deterioro. En general en la industria se cuenta con mejores controles para realizar estos suministros y existe un mejor seguimiento a los temas

asociados a la contratación, interventoría, mantenimiento y seguimiento posventa de los suministros, lo que favorece la implementación de estas tecnologías.

El suministro de estos sistemas debe estar acompañado de los fabricantes de equipos en capacitación de su manejo, operación y mantenimiento.

Las áreas para implementar las tecnologías están en función de los caudales vertidos, de la calidad del agua vertida y de las necesidades de tratamiento terciario y avanzado para suplir sus propias demandas y las de otros usuarios en cuanto a cantidad y calidad del agua para reuso.

El país cuenta con la experiencia en tratamiento de aguas residuales, y existe personal profesional y técnico que, con formación y capacitación, que puede ser completada durante en la fase de puesta en marcha de los sistemas, para acompañar la operación y mantenimiento de los sistemas instalados.

En el anexo 4 se presenta un cuadro resumen de las tecnologías enunciadas con todos los aspectos detallados y otros de importancia para el reuso industrial.

4.1.4. Uso de aguas lluvias

El agua de lluvia es una de las fuentes más utilizadas en los lugares donde existe una alta precipitación y donde la disponibilidad de agua es escasa y de baja calidad. Su captación ha permitido a diferentes comunidades abastecerse de esta agua para consumo humano, uso doméstico, consumo animal y producción agrícola. Sin embargo, las prácticas utilizadas para su recolección y almacenamiento no son las más apropiadas, ya que en algunas ocasiones su recolección propicia la contaminación del agua almacenada y puede generar problemas en la salud.

Actualmente se cuenta con técnicas de captación y recolección de aguas lluvia que se han perfeccionado y se adaptan a diferentes situaciones dependiendo de la finalidad de aprovechamiento de esta.

Una forma de mejorar las condiciones para el aprovechamiento del agua de lluvia son los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) que han sido desarrollados en diferentes partes del mundo. (Anaya Garduño, Pérez Hernandez, Martínez Ponce, & López Hernández, 2018)

Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) son el conjunto de tuberías, accesorios y equipos que captan y recolectan la lluvia que cae sobre una

superficie para conducirla a un dispositivo de almacenamiento para su uso posterior. (Anaya Garduño, Pérez Hernandez, Martínez Ponce, & López Hernández, 2018). Es una técnica que permite aprovechar el agua de lluvia para el uso y consumo y es una opción complementaria a otros sistemas con los que se pueden contar como abastecimiento.

Mediante estas técnicas se realiza el aprovechamiento del agua de lluvia para diferentes usos (consumo humano y animal, producción agrícola, ganadera y forestal y uso industrial). (Anaya Garduño, Pérez Hernández, Martínez Ponce, & López Hernández, 2018).

Para uso doméstico y consumo humano a nivel comunitario representan una solución para abastecer en cantidad y calidad a poblaciones rurales, periurbanas y urbanas que sufren de escasez; así mismo, ayuda a prevenir la presencia de enfermedades gastrointestinales y a mitigar los efectos de la sequía presentados en varios lugares de Colombia.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Las prácticas de captación de aguas lluvias se clasifican de la siguiente manera (FAO, Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, 2013):

- **Microcaptación:** Consiste en la captación generada dentro del propio terreno, por sus características es utilizada en el suministro de agua para cultivos. La microcaptación hace referencia a la captación in situ, por tratarse de un proceso de donde el agua es captada y usada en un lugar cercano o contiguo.
- **Cosecha de agua de techos de vivienda y otras estructuras impermeables:** Se basa en la captación de agua producida en las superficies impermeables o poco permeables, tales como techos de viviendas y establos, patios de tierra batida, superficies rocosas, hormigón, mampostería o plástico. Es una de las técnicas más conocidas y utilizadas, mediante esta se puede obtener agua para consumo doméstico.
- **Macrocaptación:** Consiste en la captación de agua en áreas más grandes, que no necesariamente se encuentran cerca a los sitios de utilización del agua. Las técnicas de macrocaptación son más complejas ya que incorporan principios hidrológicos de utilización de un área productora de escorrentía superficial (pendiente más elevada, suelo delgado, área rocosa,

etc.) sin o con escasa cobertura vegetal, para que genere un volumen considerable de flujo superficial.

El agua captada puede ser utilizada para abastecer estructuras de almacenamiento, como estanques o embalses temporales, para diferentes finalidades. La mayor parte de las macro captaciones se utilizan en regiones semiáridas o áridas, aunque algunas captaciones externas se aplican también en regiones subhúmedas

Para realizar sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias es necesario realizar la selección correcta de la técnica y modalidad de sistema en función de las condiciones ambientales y socioeconómicas del lugar donde se requiera. Para esto la FAO propone tener en cuenta los siguientes pasos para realizar actividades y construcción de obras de captación y aprovechamiento de aguas lluvia (FAO, Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, 2013):

- Conocer y cuantificar el ciclo hidrológico local.
- Verificar el conocimiento y experiencia de los pobladores para establecer las posibilidades de mejoramiento y necesidades de cambios.
- Verificar las necesidades inmediatas y prioritarias de los pobladores para definir las finalidades de uso del agua: consumo doméstico, pecuario, agrícola, individual o colectivo.
- Establecer participativamente los objetivos y metas, claros y factibles, de corto, mediano y largo plazo, en función de definir las mejores técnicas de captación de agua de lluvia.

La selección de una técnica de captación y aprovechamiento de aguas lluvias dependerá de las condiciones climáticas, de terreno, suelo, factibilidad económica, adaptación de la población y capacidad que tengan para utilizar el sistema.

4.1.4.1. Sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia en techos

Uno de los sistemas de captación más utilizados y conocidos es el modelo conocido como SCAPT (Sistema de Captación de Agua Pluvial en Techos).

La captación de agua de lluvia proveniente de techos de viviendas, invernaderos y otras construcciones usualmente se destina al consumo humano y utilización doméstica, por sus buenas características de calidad, normalmente mejor que el agua captada en otras estructuras.

Debido a la condición de impermeabilidad, elevación e inclinación de los techos es una forma fácil de captación de aguas lluvias.

Hoy en día, en Colombia se ha venido implementando un Sistema de Captación y Potabilización de Agua de Lluvia para Consumo Humano impulsado por el programa de cooperación Mesoamérica sin Hambre y desarrollado por la FAO en Colombia. Este sistema se ha desarrollado en el Archipiélago de San Andres y el municipio de Leticia en el Amazonas mediante un sistema de captación de agua pluvial en techos. (Corresponsables, 2017)

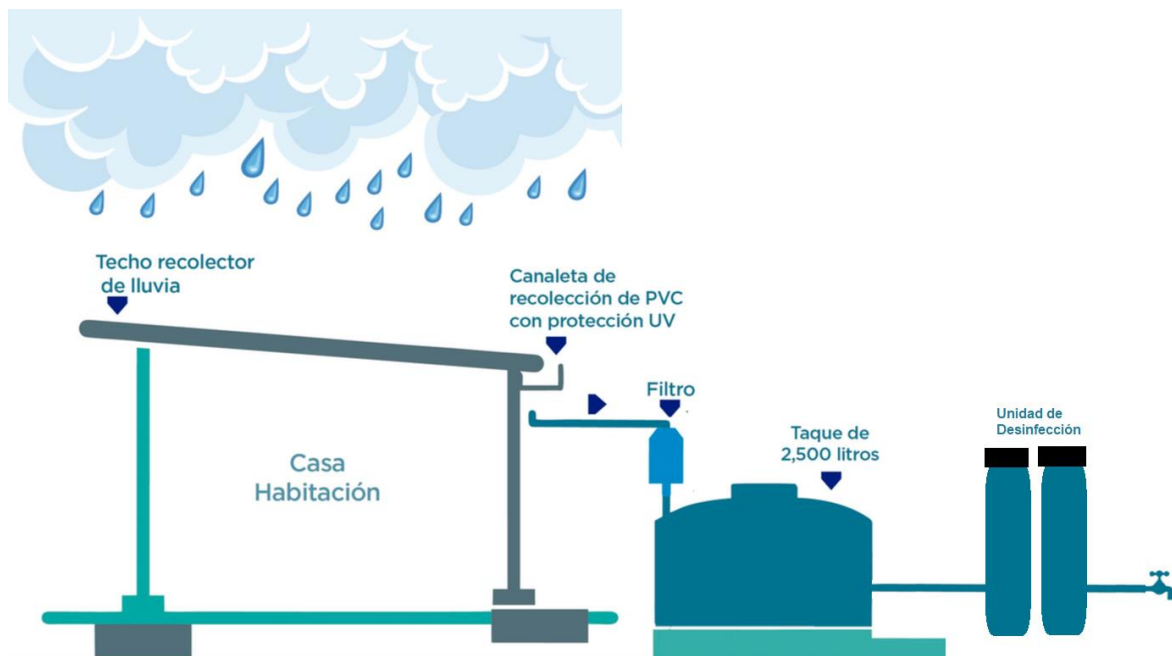
Tecnologías involucradas

El SCAPT (sistema de captación de agua pluvial en techos) es un sistema que consta de los mismos componentes con que cuenta un sistema tradicional de captación de agua superficial para abastecer una población, estos son (Quirós Vega, 2016):

- Área de captación.
- Sistema de conducción.
- Tubo de desagüe.
- Estructura de almacenamiento.
- Sistema de distribución.
- Filtración
- Desinfección.

Los componentes del sistema de captación de aguas lluvia en techo se encuentra en la Gráfico 85.

Gráfico 85. Componentes del Sistema de captación de aguas lluvia



Fuente: Adaptado de Junta Central de Agua y Saneamiento. (20 de junio de 2019). Cosechar agua con sistemas recolectores en hogares (infografía). Obtenido de Agua.org.mx: <https://agua.org.mx/biblioteca/cosechar-agua-con-sistemas-recolectores-en-hogares/>

Área de captación

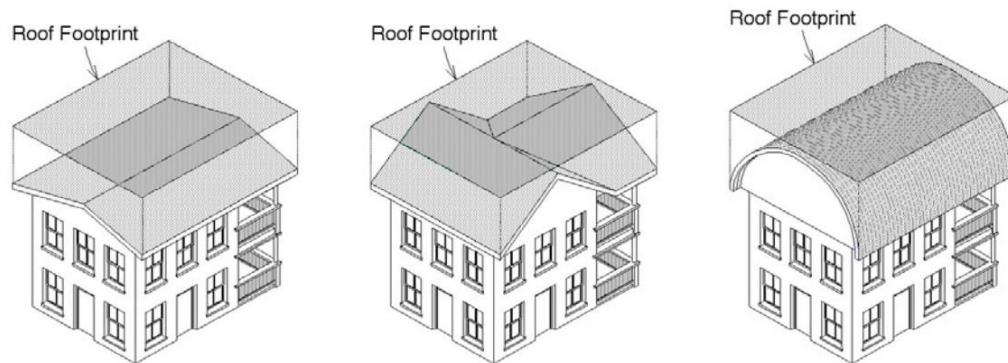
El área de captación es la superficie sobre la cual cae la lluvia. Estas áreas son los techos de las casas, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que las impermeabilizan. Es importante que los materiales con los que están construidas estas superficies no desprendan olores, colores o sustancias que contaminen el agua pluvial. (IDESPO, 2011)

La superficie debe tener el área necesaria para suplir la demanda requerida, debe contar con la pendiente necesaria para facilitar el escurrimiento del agua hasta la sección de conducción (no menor al 5%). (Quirós Vega, 2016)

En las zonas rurales, los materiales varían bastante. Los más comunes son: lámina galvanizada, lámina de asbesto (material que puede encontrar restricciones de uso en algunos países), tejas de arcilla o concreto. (FAO, Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, 2013).

Los techos de cemento y de teja son los más comunes debido a su durabilidad, el precio relativamente bajo y porque entregan agua de buena calidad; los que tienen compuestos de asfalto, amianto o los que están pintados es recomendable utilizarlos sólo cuando el agua captada no es para consumo humano, ya que pueden lixiviar materiales tóxicos en el agua lluvia.

Gráfico 86. Áreas de captación para tres tipos diferentes de techos



Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting. Texas Water Development Board. 2005

Es importante tener en cuenta que muchos techos cuentan con “valles”, que hace referencia a lugar donde dos porciones de la cubierta se encuentran en un ángulo interior, es decir cuando se considera un plan de casa con una configuración "L" o "T" (ver Gráfico 86). Estos valles concentran la escorrentía de la lluvia en dos planos del techo antes de que la lluvia se pase por el sistema de conducción,

Dependiendo del tamaño de las áreas de techo, la pendiente de los tejados y la intensidad de la lluvia, la porción de canaleta ubicada en el “valle” no es capaz de capturar toda el agua en ese punto, lo que resulta en derrames o desbordamientos. Así mismo la presencia de uno o más de estos valles en los techos puede provocar desbordamientos de las canaletas, por lo que es importante definir la superficie de captación de las aguas lluvias en techos.

Sistema de conducción

El sistema de conducción se refiere al sistema de canoas y tuberías de diferentes materiales y formas que conduce el agua de lluvia del área de captación al sistema de almacenamiento a través de bajantes con tubos de PVC. (IDESPO, 2011). Normalmente este sistema es instalado en los bordes bajos de los techos, donde el agua lluvia escurre. (Quirós Vega, 2016).

Las canaletas deben tener las siguientes características: (FAO, Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe, 2013).

- Dimensiones adecuadas al volumen de escorrentía.
- Pendiente uniforme hacia el tubo de conducción.
- Suficiente estructura de apoyo para soportar el peso del agua cuando esté bajo plena carga.
- Ser mantenidas limpias, sin impedimentos al desplazamiento de la escorrentía.
- Boca de salida suficiente para el caudal máximo.

Gráfico 87. Sistemas de conducción de aguas lluvia



Fuente: (PortalFruticola, 2017)



Fuente: (Vivir Hogar , 2009)

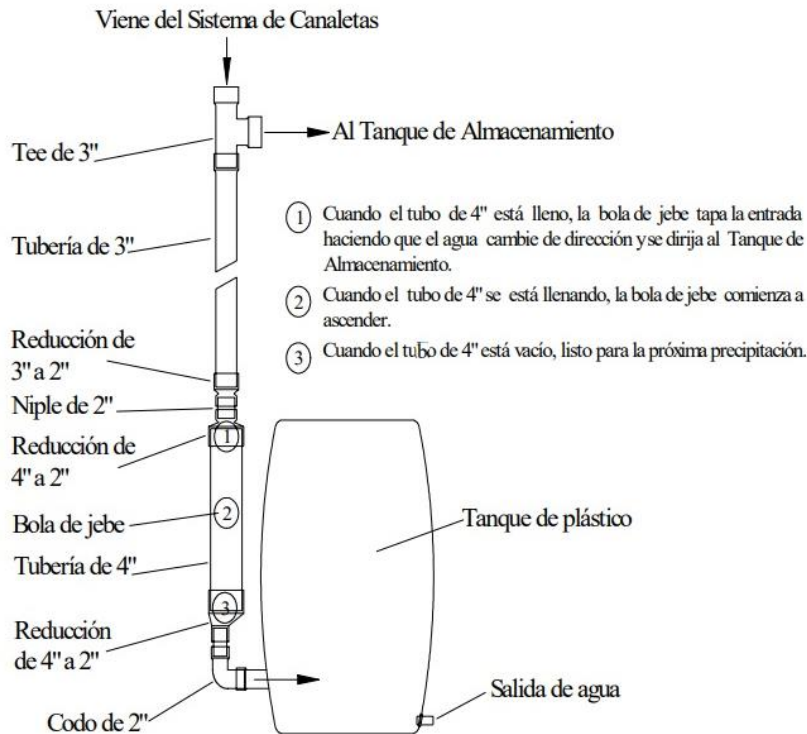
Las canaletas pueden ser semicirculares o rectangulares y fabricadas en su mayoría localmente a partir de láminas de hierro galvanizado. Estos sistemas deben mantenerse limpios y libres de material, en algunas ocasiones se realizan instalaciones de trampas de hojas que ayudan a reducir el mantenimiento del sistema.

Tubo de desagüe

Después del sistema de conducción y antes de los tanques de almacenamiento se tiene instalado el tubo de desagüe, el cual sirve para eliminar el agua producto del lavado del techo y las canoas, esto hace posible la eliminación de esas aguas contaminadas con el fin de evitar que pasen a los tanques de almacenamiento. (IDESPO, 2011).

Este dispositivo impide que el material indeseable ingrese al tanque de almacenamiento y de este modo minimizar la contaminación del agua almacenada y de la que vaya a almacenarse posteriormente (ver Gráfico 88).

Gráfico 88. Sistema de conducción de primeras aguas



Fuente: Guía de diseño para captación Del agua de lluvia, Organización Panamericana de la salud. Lima 2004.

En el diseño del dispositivo se debe tener en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo y que se estima en 1 litro por m² de techo.

Filtración

Antes de la llegada del agua a los tanques de almacenamiento se tienen dos filtros que retienen los sólidos suspendidos, de esta forma el agua que llega hasta los tanques se encuentra libre de partículas suspendidas. (IDESPO, 2011)

Estructura o Tanque de almacenamiento

Son tanques donde se almacena el agua de lluvia captada para ser utilizada y aprovechada. El volumen de almacenamiento dependerá de la demanda de agua registrada y de la superficie de captación. (IDESPO, 2011)

Los tanques de almacenamiento son el componente más costoso de la captación de aguas lluvias. Estos tanques deben ser duraderos y cumplir con unas especificaciones:

- Impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración
- De no más de 2 m de altura para minimizar las presiones
- Con tapa para impedir el ingreso de polvo, insectos y de la luz solar
- Disponer de una escotilla con tapa sanitaria lo suficientemente grande como para que permita el ingreso de una persona para la limpieza y reparaciones necesarias
- La entrada y el rebose deben contar con mallas para evitar el ingreso de insectos y animales.
- Dotado de dispositivos para el retiro de agua y el drenaje

El volumen del tanque de almacenamiento afecta significativamente los costos de capital inicial del sistema y el volumen de agua potable almacenada.

Existen dos tipos de tanques de almacenamiento que pueden construirse:

1. **Cisternas de superficie, de nivel o superior:** El sistema de almacenamiento por encima del suelo se puede comprar fácilmente en la mayoría de las comunidades, lo que permite una fácil inspección y extracción / drenaje por gravedad. Los sistemas de almacenamiento por encima del suelo requieren espacio, pueden ser más caros y susceptibles de sufrir daños por exposición constante a los elementos.
2. **Cisternas subterráneas (incluyendo parcialmente bajo tierra):** Los sistemas de almacenamiento por debajo del nivel del terreno son generalmente a precios razonables, requieren poco o nada de espacio sobre el suelo, son discretos y permiten paredes de tanque cisterna más delgadas debido al apoyo del terreno circundante.

Gráfico 89. Tipos de tanques de almacenamiento



Cisternas de superficie, de nivel o superior

Tomado de
<https://watercharity.com/conclusion-sefw-bonwire-school-rainwater-harvesting-project-ghana>



Cisternas subterráneas (incluyendo parcialmente bajo tierra)

Fuente: FAO Colombia 2019

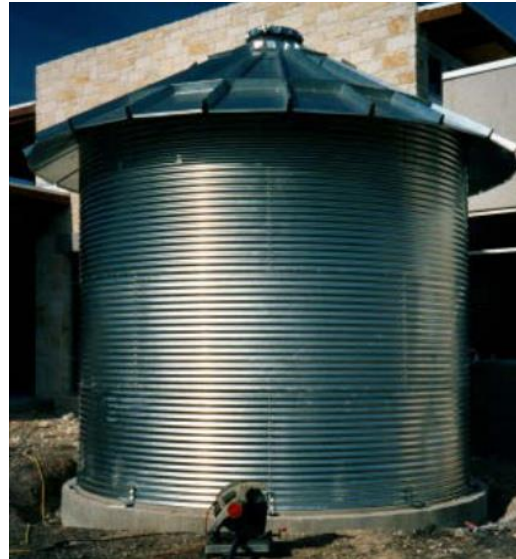
Estos tanques deben ubicarse lo más cerca posible de los puntos de utilización del agua para reducir las distancias de transporte de la misma.

Los materiales utilizados para la construcción de los tanques de almacenamiento pueden ser los siguientes:

- **Plásticos:** Fibra de vidrio, polietileno y PVC
- **Metales:** Barril de acero, tanques de acero galvanizado
- **Concreto:** Ferrocemento, piedra y bloque de concreto
- **Madera:** Madera roja, abeto, ciprés, aunque es un material eficiente es costoso



Tanque Plástico



Tanque de Metal



Tanque de Concreto



Tanque de Madera

Fuente: The Texas Manual on Rainwater Harvesting. Texas Water Development Board. 2005

Todo tanque cuenta con un volumen de capacidad máxima, cuando se llegue a ese volumen, ya sea por lluvias muy intensas o extensas, el tanque deberá de contar con un dispositivo de rebalse por donde evacuar el exceso de agua sin dañar el tanque. (Quirós Vega, 2016), el cual se describió anteriormente.

La estructura de almacenamiento ideal es aquella que cumple con los siguientes requisitos:

- Responde a las necesidades del tipo de uso previsto (doméstico, animal o vegetal) en términos de volumen almacenado y de calidad de agua requerida en cada caso.
- Permite mantener, alterar mínimamente y ser capaz hasta de mejorar la calidad del agua captada, por medio de sistemas de filtro, decantación u otro mecanismo.
- Es segura y ofrece facilidades de manejo y mantenimiento.
- Es de bajo costo y fácil de construir, de tal forma que puede ser asumida por la población afectada por la escasez de agua.

Desinfección

El nivel de tratamiento que se realice al agua lluvia dependerá del uso para el cual estará destinada. Para actividades de preparación de alimentos, bebidas, higiene de personal, es necesario agua de buena calidad. En actividades donde el agua sería utilizada para la limpieza, lavado de autos, inodoros, entre otros, no es necesario un tratamiento de calidad.

Como sistema de desinfección o purificación se puede tener los equipos de desinfección como lámparas UV, los de osmosis invertida, cloradores, entre otros. Estos se encargan de eliminar cualquier microorganismo que se encuentre en el agua y pueda afectar la salud humana. (IDESPO, 2011)

La vida útil de estos sistemas depende del manejo y mantenimiento que se realice, ya que pueden tener una vida útil aproximada de 40 años.

Los tratamientos de desinfección generalmente consisten en procesos de filtración y desinfección en serie antes de la distribución para asegurar la salud y seguridad de la población.

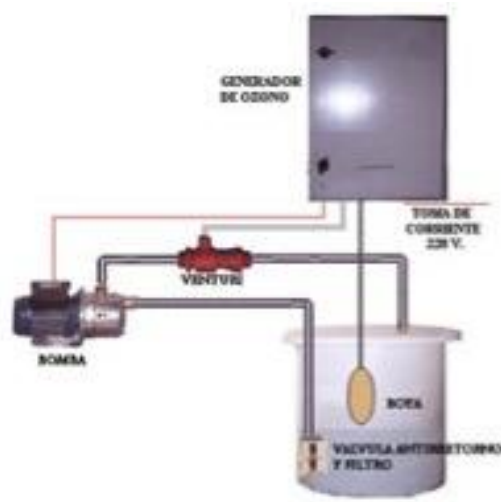
Ozono

El ozono es un tipo de desinfectante que actúa como un agente oxidante, eliminando olores, color y carbono orgánico en el agua. El tratamiento con ozono tiene la capacidad de lograr niveles más altos de desinfección en comparación con el cloro o la luz ultravioleta; sin embargo, los costos de inversión, así como los gastos de mantenimiento no son competitivos con las alternativas disponibles. Por lo tanto, el ozono es utilizado con poca frecuencia, principalmente en casos especiales en los cuales otras alternativas no son efectivas.

Debido a su elevado potencial de oxidación, el ozono degradará eficazmente microbios y virus, causando la ruptura de la membrana celular y la descomposición de compuestos biomoleculares esenciales, por ejemplo, bacterias.

La técnica se basa, fundamentalmente, en lograr un tiempo de contacto adecuado del agua, con la cantidad adecuada de ozono. Concentraciones de entre 0.5 y 0.8 mg/l de ozono durante unos tres o cuatro minutos son suficientes para conseguir una calidad de agua excepcional y desinfectada.

Gráfico 90. Desinfección por ozono



Fuente: <http://www.hidritec.com/hidritec/tratamiento-de-agua-potable-con-ozono>

Cloración

La cloración es una tecnología bien establecida, más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono.

El cloro elimina las bacterias, hongos, esporas, algas, reduce olores, sabores y remueve los diferentes compuestos nitrogenados del agua. La desinfección con cloro proporciona una protección continua en el agua y es uno de los sistemas de potabilización más utilizados.

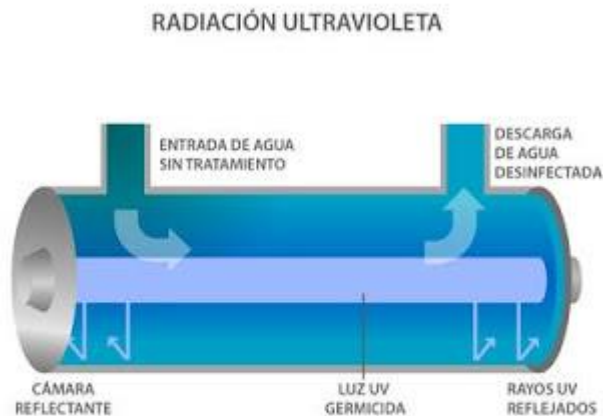
Ultravioleta

Los sistemas de desinfección de luz Ultravioleta (UV), eliminan aproximadamente 99,99% de agentes patógenos en el agua. Es necesario que los

procesos previos del agua eliminen cualquier turbiedad de la misma, ya que la luz Ultravioleta debe poder atravesar perfectamente el flujo de agua a tratar.

El sistema funciona mediante la radiación o iluminación del flujo de agua con una o más lámparas de silicio cuarzo, con unas longitudes de onda de 200 a 300 nanómetros. Por lo tanto, el agua fluye sin detenerse por el interior de los purificadores, que contienen estas lámparas.

Gráfico 91. Desinfección Ultravioleta



Fuente: <https://purewater.com.co/sistemas-de-desinfeccion-de-agua-mediante-luz-ultra-violeta/>

En el caso de los sistemas desarrollados en el Archipiélago de San Andrés y el municipio de Leticia en el Amazonas mediante captación de agua pluvial en techos el proceso de desinfección se inicia enviando por motobomba a un tanque de cloración; ya clorada pasa por un filtro de arena, de carbón y dos microfiltros, un equipo de luz ultravioleta y un generador de Ozono como se observa en el Gráfico 92.

Gráfico 92. Sistema de desinfección



Fuente: FAO. (14 de diciembre de 2017). Obtenido de Representación FAO Colombia: <https://www.flickr.com/people/75113635@N06/>

Sistema de distribución

El sistema de distribución del agua captada consta de una tubería de PVC que conduce el agua de los tanques de almacenamiento hasta el sitio donde se quiere llevar para su uso. (IDESPO, 2011)

Este sistema puede estar formado por una sola línea de tubería o una red, todo dependerá de los usos para los cuales se necesite el agua.

Gráfico 93. Sistema distribución aguas lluvia



Fuente: FAO. (14 de diciembre de 2017). Obtenido de Representación FAO Colombia: <https://www.flickr.com/people/75113635@N06/>

Área requerida

Como es un sistema de captación en techo el área necesaria requerida dependerá de la capacidad del tanque de almacenamiento a instalar, que está en función de la demanda de agua requerida para un uso determinado.

Infraestructura

Debido a que es un sistema práctico para viviendas, la infraestructura requerida es mínima.

La captación se compone del techo o área destinada para la captación del agua de lluvia y de las canaletas o dispositivos que recolectan y entregan el agua captada hasta el inicio de la tubería de conducción. (CONAGUA, Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda, 2016)

Se debe garantizar una pendiente mínima del 2% en el área de captación para generar un escurrimiento hacia las canaletas, así también las canaletas deberán contar con una pendiente de al menos el 2% en el sentido del flujo hacia el tubo colector que entrega a la conducción

En la filtración se evita el ingreso de agentes contaminantes al depósito o tanque de almacenamiento, se puede utilizar una barrera física como un filtro graduado de acuerdo al plano tipo o proyecto específico que diseñe, así mismo se puede optar por la instalación de un sistema de recolección de primeras aguas.

Los materiales con que se fabrique el dispositivo que se elija, deben ser inertes, de tal manera que garanticen que no se afectarán las condiciones organolépticas del agua captada.

En la conducción se debe contar con un filtro tipo malla o un dispositivo equivalente separador de hojas y materiales similares, que evite el ingreso de sólidos arrastrados en la captación al interior del almacenamiento. (CONAGUA, Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda, 2016).

La recolección del agua de lluvia se realiza en tanques que deben tener el volumen necesario para garantizar la dotación establecida, y ser (CONAGUA, Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda, 2016):

- Impermeables, para evitar pérdidas por goteo o transpiración.
- Herméticos: para evitar contaminación, el ingreso de luz solar y la proliferación de insectos.
- Accesible y con abertura amplia para realizar la limpieza.
- Accesible para realizar reparaciones necesarias en el caso de tanques fabricados en sitio.

Se recomienda que los tanques en los sistemas de captación de agua de lluvia sean superficiales, con la finalidad de evitar los costos originados por la excavación en el caso en que fueran enterrados. De igual manera, al estar en la superficie, se facilita la inspección por parte del usuario el detectar fugas en el mismo y proceder a repararlas.

La llegada al depósito deberá ubicarse en la parte superior del mismo, y se deberá colocar una salida de desfogue mediante tubería de PVC, ABS, Polipropileno o Polietileno, que cuente al menos con el mismo diámetro nominal de la entrada.

La salida de excesos deberá ubicarse de tal manera que se le permita al usuario recolectar el agua que se desfogue en el tanque en algún depósito de menores dimensiones como puede ser una cubeta o cualquier depósito movable que el usuario pueda colocar en la salida del tubo de desagüe.

La salida del tanque o depósito de almacenamiento para dar el servicio a la vivienda mediante la toma domiciliaria consiste en un tubo de PVC, ABS, Polipropileno, Polietileno o Fierro Galvanizado, el cual debe contar en el extremo a la salida con una llave o válvula general de control, posterior a esta válvula se instala la toma domiciliaria correspondiente.

El agua para consumo humano debe estar libre de sustancias químicas, impurezas y de microorganismos patógenos que puedan causar problemas a la salud de las personas, aplicando métodos sencillos de desinfección se podrá garantizar la calidad del agua.

La desinfección del agua mediante cloración se hace a partir de compuestos que contienen cloro como el hipoclorito de sodio y el hipoclorito de calcio, elemento químico que tiene poder destructivo sobre los microorganismos patógenos que son transmisores de enfermedades de origen hídrico, que pueden estar presentes en el agua.

Para asegurar la calidad de agua para uso humano, es ideal contar con alguna redundancia en tratamiento. Hacia ese fin, se puede combinar el uso de cloro anteriormente mencionado con un filtro de última etapa que tenga otro mecanismo de desinfección. Dicho filtro puede ser de cerámica impregnada con plata coloidal, de carbón activado impregnado con plata coloidal, de luz ultravioleta y/o de microfibra.

Costos

Los costos de inversión de los proyectos de aprovechamiento de agua de lluvia son relativamente bajos. Lo más costoso es el almacenamiento. Es por ello que el diseño del almacenamiento tanto en tamaño como en tipo de tanque es crucial, sin embargo, este varía dependiendo de la capacidad del tanque a instalar.

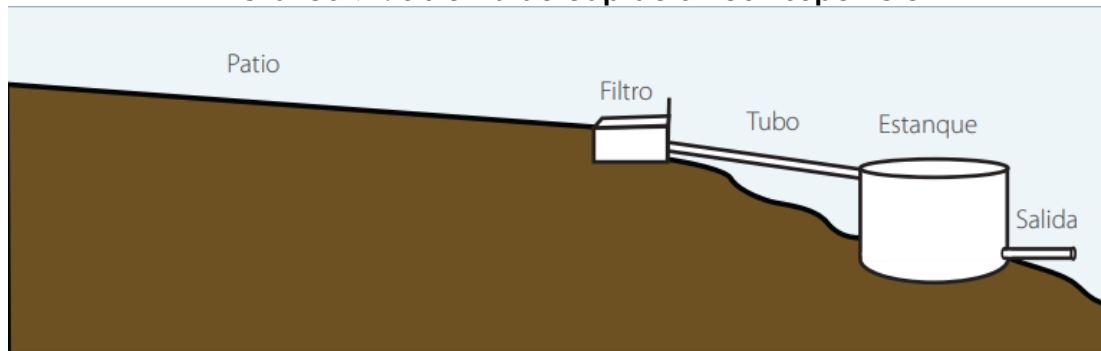
El presupuesto de los valores de materiales y costos, para un sistema de colecta de aguas lluvias, utilizando una cisterna flexible de 10.000 litros, para la acumulación de aguas lluvias de una casa es de 1.457 USD, pero se aclara que tanto la disponibilidad de materiales como los precios pueden variar dependiendo del proveedor y ciudad donde se adquieran. No incluye valor de mano de obra.

El valor en materiales y costo de construcción de una cisterna semienterrada de ferrocemento de 10.600 Lts (3 m de diámetro y 1,5 m de altura) es de 1085 USD. A ese valor se debe agregar el valor de mano de obra que puede ascender a un valor entre 607 a 630 dólares. (informe 2)

4.1.4.2. Sistema de captación de estructuras impermeables superficiales

Estos sistemas se utilizan cuando la demanda de agua requerida a captar es mayor, por lo que se requiere una estructura de captación de agua más amplia como canchas, patios impermeables y estacionamiento.

Gráfico 94. Sistema de captación con superficie



Fuente: FAO. (2013). Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA).

Las áreas de captación en estos sistemas pueden ser de diferentes materiales:

- Mampostería u hormigón
- cubierta de lámina plástica
- piso emparejado y compactado
- Lajas de piedra natural (rocas calizas, por ejemplo), donde existan

Tecnologías involucradas

El sistema de captación de agua de lluvia en superficies impermeables sobre el terreno incluye los siguientes componentes (FAO, 2013):

Piso de captación

El terreno donde será construido el patio de captación debe ser casi plano. Si es posible debe tener la misma pendiente que tendrá la estructura impermeable, para que haya poco corte o relleno. (FAO, 2013)

El piso del área de captación puede ser de diferentes materiales, dependiendo de la capacidad económica, objetivos de uso y condiciones del lugar. (FAO, 2013)

- **Suelo emparejado y compactado:** Es la superficie más simple y barata, pero el agua que se capta suele no ser de buena calidad para consumo doméstico.
- **Lajas de rocas:** Si existen en el lugar lajas de rocas expuestas en la superficie, se pueden aprovechar para establecer el área de captación.

- **Lámina plástica:** La cobertura plástica presenta como ventaja la facilidad y rapidez para establecer la captación y el elevado coeficiente de escorrentía, si el terreno está bien emparejado y uniforme.
- **Hormigón:** Probablemente es la opción de piso más trabajosa y de costo más alto, pero es la más eficiente, duradera y fácil de manejar.

Filtración

El filtro en este sistema es el elemento más importante ya que en las captaciones de agua siempre existe presencia de detritos e impurezas en la escorrentía.

Costos

Los componentes de costo del sistema de captación en patios impermeabilizados, sin incluir la construcción del estanque o cisterna de captación, son muy variables, dependiendo de la dimensión del patio y el tipo de material utilizado.

4.1.4.3. Sistema de captación por atrapanieblas

La captación de niebla es una modalidad que requiere condiciones climáticas y orográficas muy particulares. Debe existir niebla densa, constante y desplazándose al ras de la superficie del terreno para que pueda ser captada con eficiencia. Para la factibilidad de un proyecto, debe estar presente, en condiciones de producción de agua, por un tiempo razonable durante el año. (FAO, 2013).

Gráfico 95. Sistema de captación de atrapanieblas



Fuente: Poveda Lancheros; Sanabria Infante. (2017). Evaluación de la eficiencia de cinco materiales de malla para el sistema de atrapanieblas en el Municipio de Siachoque – Departamento de Boyacá. Siachoque: Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente CEAD - Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.

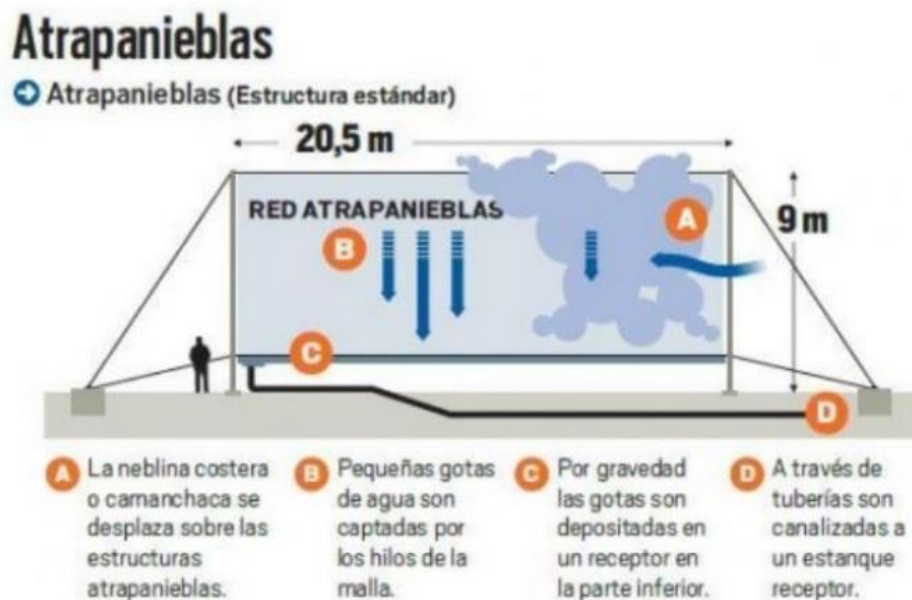
La captación del agua de la niebla es realizada por medio de paneles atrapa niebla (ver Gráfico 95) que consisten en dos postes de madera fuertemente fijados en el suelo, a los cuales se sujetan cables que soportan una cortina de malla, generalmente doble. (FAO, 2013)

Tecnologías involucradas

Estos sistemas consisten en (Poveda Lancheros; Sanabria Infante, 2017):

- Una malla colectora con una luz determinada, que deja pasar la niebla y sobre la cual condensan el contenido en agua de la misma. Las mallas atrapanieblas están hechas con hilos de polipropileno, similares al nylon; pero pueden utilizarse otros materiales.
- Unos soportes que sirven de estructura para la malla colectora.
- Una canaleta recolectora sobre la cual, por gravedad, se recoge el agua condensada.
- Un depósito o recolector donde se almacena el agua acumulada y desde la cual se canaliza hasta el punto de consumo.

Gráfico 96. Esquema general de un sistema atrapanieblas



Fuente: Sánchez Cabanillas, J. (2018). Atrapanieblas tecnología para el atrapamiento de agua, una experiencia exitosa para las políticas públicas en el distrito de Villa María del Triunfo. Lima: Escuela de Posgrado. Universidad Cesar Vallejo.

La altura de cada panel varía de 4,0 a 6,0 m, estando entre 1,0 a 2,0 m del suelo. La cortina de malla tiene de 3,0 a 4,0 m de alto. La longitud de cada panel

es de 10,0 a 12,0 m, aunque pueden ser de menor tamaño, si los postes y cables no son suficientemente resistentes. Para sostener la estructura se utilizan por lo menos tres cables de acero, los cuales cumplen la función de tirantes. (FAO, 2013)

El agua en suspensión, al chocar con la malla, queda atrapada. Una gotita se une a otras formando gotas más grandes que se desplazan hacia la base del panel donde precipitan a una canaleta ubicada debajo de la malla. Desde allí es conducida por una tubería al estanque de almacenamiento y distribuida para diferentes usos. (FAO, 2013)

Costos

Esta técnica se adapta más para proyectos colectivos para atender comunidades o pequeños municipios, ya que el uso de mallas atrapanieblas requiere de estudios técnicos previos para verificar su potencial de captación (densidad, persistencia, estabilidad de la niebla), orientación y altura de los paneles, dimensión de los paneles necesarios, etc.

Los costos estimados para la construcción de un sistema “Atrapanieblas” simple son de 389 USD. Se le debe agregar la mano de obra que puede alcanzar los 445 USD para un total de 834 USD. (Informe 2)

Los costos de instalación dependen básicamente del número y del tamaño de los paneles que deben ser construidos para captar el volumen de agua necesario, así como de la distancia y dificultades para hacer llegar la tubería de conducción hasta los puntos de utilización.

4.1.4.4. Requisitos de implementación

Existen diferentes configuraciones de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, los cuales pueden ser sencillos y económicos o muy complejos y costosos, de acuerdo con las condiciones propias del proyecto y al uso de la edificación.

Sin embargo, es necesario que antes de realizar la implementación de esta técnica se tenga en cuenta:

- **Variables ambientales:** Es decir datos de precipitación de la zona, meses de época seca y lluviosa.

- **Variables físicas:** La infraestructura existente, el estado de la infraestructura, el lugar donde se ubicará el tanque de almacenamiento y los materiales con que se dispone
- **Variables socioeconómicas:** Cantidad de personas que dependerán del agua recolectada, usos que se le dará al agua recolectada y los recursos disponibles

Los pasos para realizar el diseño de un sistema de captación son (Pizarro, y otros, 2015):

- a) Localización del sitio para establecer el sistema,
- b) Determinación de la demanda,
- c) Cálculo de la disponibilidad de agua,
- d) Diseño del área efectiva de captación de precipitación,
- e) Diseño del sistema de conducción del agua captada,
- f) Diseño del volumen del sedimentador o trampa de sólidos y
- g) Diseño del sistema de almacenamiento de agua captada

4.2. Análisis costo beneficio

En este apartado se presenta el resultado del análisis del costo de reúso frente al costo de abastecimiento por región, con el fin de estimar el costo beneficio que se generaría para el usuario.

Con el objeto de realizar el análisis costo beneficio derivado de la actividad del reúso del agua residual tratada en Colombia, es preciso tener en cuenta los diferentes escenarios de uso del recurso, a partir del ciclo productivo del agua desde la captación en la(s) fuente(s) hasta su disposición final.

Cada escenario contendrá un análisis de oferta de agua a partir de la fuente hídrica; los costos de captación, tratamiento y distribución de agua potable (tarifa del servicio público domiciliario de acueducto) y; los costos de recolección, transporte y disposición final de las aguas residuales (tarifa del servicio público domiciliario de alcantarillado). También se efectuará un análisis de la demanda del agua para cada uso en las actividades productivas que potencialmente podrían ser usuarias del reúso de agua.

Debido a que no es legalmente posible emplear el agua residual sin ningún tipo de tratamiento para su reúso en alguna actividad económica, aun cuando la realidad es que en algunas zonas del país se realiza reúso sin el tratamiento de las

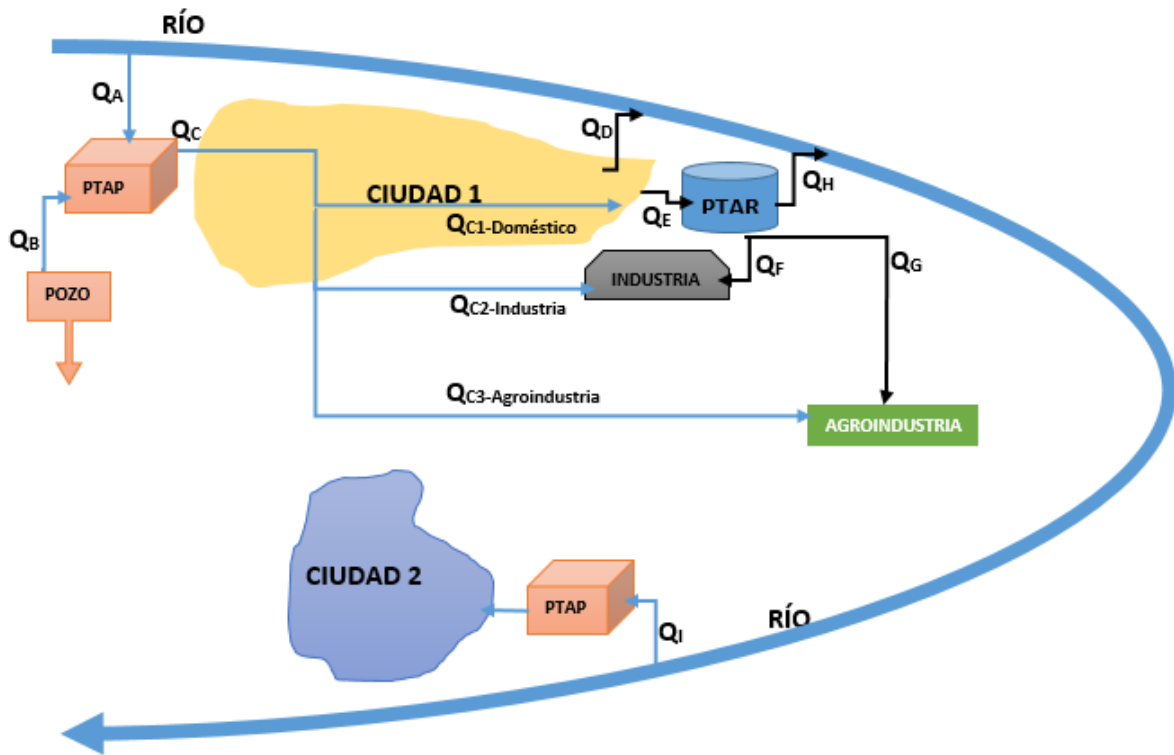
aguas residuales, para efectos del análisis se parte del supuesto que la totalidad de las aguas empleadas para el reúso, previamente han tenido un proceso de tratamiento.

A nivel general, como se observa en la ilustración, para atender la demanda de un municipio, se puede contar con una o varias fuentes tanto superficiales (Q_A) como subterráneas (Q_B). Por lo tanto, el agua a potabilizar sería la sumatoria de Q_A y Q_B (Q_A+Q_B).

Una vez realizado el tratamiento del agua, se cuenta con un caudal de distribución Q_C , que podría ser empleado para tres usos: doméstico (Q_{C1}), industrial (Q_{C2}) y agroindustrial (Q_{C3}).

Una vez consumida el agua en todos los usos anteriormente mencionados, la siguiente etapa es la descarga del agua residual directamente en la fuente (Q_D), que como se mencionó anteriormente, para los análisis costo beneficio no se tendrá en cuenta esta opción. En ese sentido, el usuario del recurso realizará el tratamiento de las aguas residuales (Q_E) para descargar este caudal a una fuente hídrica (Q_H).

El anterior ciclo se repetirá por parte de otro usuario (para el caso de las aguas residuales domésticas, el municipio) aguas abajo de una misma fuente que ha sido afectada por descargas de aguas residuales, no tratadas o tratadas previamente en una PTAR (Q_I):



Con base en el esquema anterior, a continuación, se plantean dos escenarios para el análisis costo beneficio:

Escenario 1 (E1): Uso de agua potable tratada (PTAP) para las actividades agroindustriales e industriales. Situación inicial donde no se efectúa el reúso del agua, es decir "no hacer nada".

Contempla emplear el agua potable tratada en la PTAP del municipio para usos adicionales al doméstico, tales como la agroindustria y la industria. Incluye también el supuesto de efectuar algún sistema de tratamiento de las aguas residuales y la afectación de la cuenca para una posterior captación por parte de otro municipio. Se cuantificará el siguiente proceso:

$$E_1 = Q_A \text{ y/o } Q_B + Q_C (Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3}) + Q_E + Q_H + Q_I$$

Escenario 2 (E2): Uso de agua residual tratada para las actividades agroindustriales e industriales. Se lleva a cabo el reúso del agua.

Contempla el uso del agua residual tratada en la PTAR del municipio para actividades de reúso en la agroindustria y la industria. Incluye las estimaciones de los "costos evitados" en ambas actividades, así como la estimación del caudal que

generará un alivio en el estrés hídrico de la cuenca. Igualmente, se podría incurrir en otro costo evitado al no emplearse tanta cantidad de químicos para potabilizar el agua en aquellos municipios ubicados aguas abajo del municipio que realiza las descargas de agua residual. Se cuantificará el siguiente proceso:

$$E_2 = Q_A \text{ y/o } Q_B + Q_{C1} + Q_E + Q_F + Q_G + Q_H + Q_K$$

El análisis de cada uno de los dos escenarios anteriores tendrá en cuenta no solamente el costo beneficio financiero de las actividades involucradas, sino la cuantificación del grado de afectación de la cuenca debido a la oferta hídrica requerida en cada actividad de consumo, es decir, el componente ambiental.

4.2.1. Supuestos e información empleada para el análisis

Para realizar los cálculos y estimaciones en el análisis costo beneficio del presente estudio, es necesario partir de los supuestos que se exponen a continuación:

- La información empleada para los cálculos tendrá como fecha de corte el año 2018.
- Por cada región, se obtuvo la información correspondiente al número de suscriptores por estrato y sector, consumos medios de agua potable, pérdidas de agua y tarifas, con base en la información que reportan los prestadores de los servicios públicos domiciliarios al Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), así como del Estudio Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018 - SSPD.

Los datos correspondientes a Bogotá y Barranquilla fueron tomados de informes de las Empresas, ya que cuando se hizo la consulta al SUI no aparecían reportados para el año 2018.

Una vez obtenida la información anterior, se hizo la validación de la consistencia de los datos. Es decir, los datos atípicos se consideraron outliers y se excluyeron de los análisis.

- La información de población corresponde a la del Censo 2018 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
- La demanda hídrica, consistente en la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas,

desde el punto de vista económico y para el uso doméstico, se obtuvo para cada región, a partir del Estudio Nacional del Agua 2018.

- Si bien el caudal tratado de agua residual a nivel nacional es bajo, debido a que el reúso de agua residual debe partir del tratamiento de agua, es necesario hacer el supuesto de que todas las regiones cuentan con un sistema de tratamiento en funcionamiento. Esto debido a que aun cuando en muchos municipios a nivel nacional no se realiza la actividad de tratamiento de sus aguas residuales¹²⁰, el hecho de reutilizarla sin ningún tipo de tratamiento (como sucede en algunos casos) generaría un costo de cero pesos. Bajo este entendido, no se podría realizar un análisis de costo beneficio. Adicionalmente, se debe partir en los análisis de comparación, que se cumple con las disposiciones ambientales vigentes.

Bajo este supuesto, para efectos de estimar los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX) de las tecnologías de tratamiento de agua, se emplearon aquellas mencionadas en el numeral 4. TÉCNICAS DE REÚSO IMPLEMENTABLES EN COLOMBIA del presente informe.

Concretamente se emplearán dos tecnologías, según el número de habitantes promedio por región. La primera consiste en un sistema de tratamiento de laguna anaerobia + laguna facultativa + laguna de maduración (LA+LF+LM). Esta tecnología se recomienda para poblaciones de hasta 10.000 habitantes.

La segunda tecnología empleada para los análisis será la de lodos activados con aireación extendida. Este es el sistema más utilizado y conocido en Colombia de sistemas compactos con aireación mecánica. Se recomienda su empleo para poblaciones a partir de 10.000 habitantes.

Es claro que cada tecnología de tratamiento empleada debe obedecer a diferentes factores, entre otros, piso térmico, número de habitantes, tipo de caudal a tratar, calidad del vertimiento establecido en la normatividad ambiental, entre otros. En este sentido, lo ideal sería elaborar un estudio individual por cada municipio o zona que permita seleccionar la mejor alternativa de tratamiento.

No obstante, para efectos del estudio, se han estimado funciones de costos para cada una de las dos tecnologías que se emplearán para los cálculos,

¹²⁰ De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua 2018 del IDEAM, en 2016, el país presentó un nivel de tratamiento de sus aguas residuales del 42,2%.

las cuales se expusieron en los numerales 4.1.1.1 y 4.1.1.2 del presente informe. Estas funciones fueron estimadas por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios, cuya forma se encuentra expresada como $(B \text{ (pendiente)} * \text{Población}) + A \text{ (Constante)}$.

- Debido a que, en algunas zonas del país, los cultivos son regados con agua residual sin tratar, o mediante captaciones ilegales de la fuente (sin concesión de aguas) o de las redes de aducción de los prestadores del servicio público de acueducto, se asumirá que el agua empleada para estas actividades proviene de un prestador de servicio público mediante redes de distribución.
- Para la elaboración del análisis costo beneficio, se elaboró un modelo matemático en formato Excel, el cual permite simular escenarios y proyecciones para el reúso del agua residual tratada

4.2.2. Generalidades de las regiones

4.2.2.1. Región Caribe

La región Caribe está localizada en la parte norte del país y actualmente la conforman ocho departamentos La Guajira, Magdalena, Atlántico, Cesar, Córdoba, Sucre, San Andrés y Providencia y Bolívar. Tiene un área de 132.288 Km², los cuales representan el 11.6% de los 1'141.748 Km² que comprende el total del territorio nacional.

En los TDR de la consultoría se requería incluir el análisis por separado del área insular, sin embargo, dado que la misma hace parte de la región caribe, se incluye dentro de la misma.

Gráfico 97. Mapa de la Región Caribe



Tabla 41. Población por departamento región Caribe

| Departamento | Capital | Población departamento (hab- 2020) | No. de Municipios |
|---|---------------------|------------------------------------|-------------------|
| Atlántico | Barranquilla | 2.722.128 | 23 |
| Bolívar | Cartagena de Indias | 2.180.976 | 46 |
| Cesar | Valledupar | 1.295.387 | 25 |
| Córdoba | Montería | 1.828.947 | 29 |
| La Guajira | Riohacha | 965.718 | 15 |
| Magdalena | Santa Marta | 1.427.026 | 30 |
| Sucre | Sincelejo | 949.252 | 25 |
| Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina | San Andres | 63.692 | 2 |
| Total Región Caribe | | 11.433.126 | 195 |

Fuente: Proyecciones censo Nacional de Población 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística

Vale la pena mencionar que, al efectuar una revisión de los datos disponibles de la Isla de San Andrés con base en información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD)¹²¹, se menciona que la isla de San Andrés

¹²¹ Evaluación Integral de prestadores Proactiva Aguas del Archipiélago S.A. E.S.P, marzo 2017. (Actualmente la empresa se denomina VEOLIA)

presenta otras características disímiles frente a ciudades y municipios de la zona continental, dentro de los cuales se mencionan los siguientes:

- *“Si bien se presenta una gran oferta de agua correspondiente al agua marina salada, para el caso de provisión de agua potable dulce se generan restricciones en la disponibilidad de la misma. Esto es, se puede tener la cantidad suficiente, pero no en condiciones de calidad apropiadas para convertirla en agua potable dulce para el consumo humano.*
- *Los recursos de agua cruda dulce (correspondiente a pozos) son limitados frente a la cantidad de población que reside y visita la isla anualmente. Por mantener una actividad económica basada en el turismo y comercio, se estima que residen cerca de 72.000 habitantes y visitan anualmente la isla alrededor de 1,4 millones de personas. Esta distorsión genera la necesidad de establecer otras metodologías para la estimación de la demanda y dimensionamiento de la infraestructura tanto de acueducto como de alcantarillado.*
- *La mayor parte de población residente como visitante se ubica sobre la zona norte costera, donde las condiciones de suelo pueden variar desde roca coralina hasta suelos conformados por arena o sedimentos marinos. Sus implicaciones son importantes al generar proyectos de inversión en infraestructura de redes, tanques, plantas o estaciones de bombeo, tanto en costos como en metodologías de construcción y operación.*
- *A diferencia de la zona continental colombiana donde se presenta una topografía montañosa y se aprovecha el potencial gravitacional para el diseño, construcción y operación de sistema de acueducto y alcantarillado (en términos del fluido agua), las pequeñas diferencias de cotas o conformación relativamente llana de la isla, obliga a recurrir de fuentes alternas de generación de energía eléctrica como la gasolina o el diésel, para impulsar el agua y llevarla a las edificaciones de la isla. Estos insumos (gasolina, diésel o gas) no se producen en la isla, por lo tanto, tienen que importarse de la zona continental para la provisión del servicio de energía eléctrica.*
- *Frente a un ambiente salino, los elementos de la infraestructura de los servicios deben considerar técnicas y esquemas de mantenimiento más rigurosos y especializados de tal manera que preserven la funcionalidad y consecuentemente la calidad y continuidad en la prestación de los servicios.”*

Asimismo, este documento menciona que *“gran parte de los usuarios se auto abastecen a partir de pozos propios, agua lluvia, carrotanques, o plantas desalinizadoras, o bien con posibilidad de conexión, no hacen uso del sistema de acueducto, lo que distorsiona una proyección típica de demanda para el dimensionamiento y necesidades del sistema”*.

Esta situación genera que los indicadores de prestación del servicio en la isla sean atípicos debido a las particularidades mencionadas. Según datos de la SSPD¹²², la cobertura urbana y rural del servicio público de acueducto para el año 2018, es de 46,79% y 61,09 respectivamente. La continuidad del servicio es de 9,4 horas al día y el nivel de pérdidas de agua es de superior al 80%.

Dentro de las particularidades de la isla, debido a la escasa oferta de agua dulce, dentro del contrato de operación suscrito con la entonces empresa Proactiva (hoy Veolia), se ha definido un consumo básico de 8 metros cúbicos mensuales.

Con relación al servicio público domiciliario de alcantarillado, se menciona que en los mismos términos que el sistema de acueducto, muchos suscriptores no se encuentran vinculados al sistema de alcantarillado, y cuentan con sistemas de disposición individuales, pozos sépticos o plantas propias de aguas residuales. A los suscriptores que forman parte del sistema de alcantarillado de la empresa, no se les realiza tratamiento de aguas residuales debido a que la isla cuenta con un emisario submarino¹²³.

Por lo anteriormente expuesto, dada la escasa oferta de agua, los bajos niveles de cobertura, los altos índices de pérdidas de agua potable y contar con un emisario submarino en lugar de PTAR, entre otros aspectos, la actividad de reúso de agua tratada no es posible, como tampoco se considera como una solución prioritaria de las aguas residuales en la isla.

Por el contrario, la actividad de uso de aguas lluvias como una alternativa de abastecimiento, dada la escasez de agua dulce, se puede considerar como una solución viable y sostenible en la isla de San Andrés.

¹²² Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018. SSPD, diciembre 2019

¹²³ Permiso Ambiental otorgado por CORALINA, según Resoluciones No.507 de 1997 y 017 de 2012.

4.2.2.2. Región Andina

La región Andina está localizada en la parte central del país y actualmente la conforman once departamentos. Presenta un área de 282.540 Km², los cuales representan el 24% de los 1'141.748 Km² que comprende el total del territorio nacional.

Gráfico 98. Mapa de la Región Andina



Tabla 42. Población por departamento región Andina

| Departamento | Capital | Población departamento (hab- 2020) | No. de Municipios |
|----------------------------|-------------|------------------------------------|-------------------|
| Antioquia | Medellín | 6.677.930 | 125 |
| Boyaca | Tunja | 1.242.731 | 123 |
| Caldas | Manizales | 1.018.453 | 27 |
| Cundinamarca | Bogotá | 3.242.999 | 116 |
| Bogotá DC | - | 7.743.955 | - |
| Huila | Neiva | 1.122.622 | 37 |
| Santander | Bucaramanga | 2.280.908 | 87 |
| Quindio | Armenia | 555.401 | 12 |
| Risaralda | Pereira | 961.055 | 14 |
| Norte de Santander | Cúcuta | 1.620.318 | 40 |
| Tolima | Ibagué | 1.339.988 | 47 |
| Total Región Andina | | 27.806.360 | 628 |

Fuente: Proyecciones censo Nacional de Población 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística

4.2.2.3. Región Amazónica

La región Amazónica está localizada en la parte sur del país y actualmente la conforman seis departamentos. Presenta un área de 483.119 Km², los cuales representan el 41% de los 1.141.748 Km² que comprende el total del territorio nacional.

Gráfico 99. Mapa de la Región Amazónica



Tabla 43. Población por departamento región Amazónica

| Departamento | Capital | Población departamento (hab- 2020) | No. de Municipios |
|-------------------------------|-----------|------------------------------------|-------------------|
| Amazonas | Leticia | 79.020 | 11 |
| Caquetá | Florencia | 410.521 | 16 |
| Guainia | Inírida | 50.636 | 9 |
| Guaviare | Guaviare | 86.657 | 4 |
| Putumayo | Mocoa | 359.127 | 13 |
| Vaupés | Mitú | 44.712 | 6 |
| Total Región Amazónica | | 1.030.673 | 59 |

Fuente: Proyecciones censo Nacional de Población 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística

4.2.2.4. Región Orinoquia

La región de la Orinoquía está localizada en la parte oriental del país y actualmente la conforman cuatro departamentos. Presenta un área de 285.437

Km², los cuales representan el 18% de los 1'141.748 Km² que comprende el total del territorio nacional.

Gráfico 100. Mapa de la Región Orinoquía



Tabla 44. Población por departamento región Orinoquía

| Departamento | Capital | Población departamento (hab- 2020) | No. de Municipios |
|-------------------------------|----------------|------------------------------------|-------------------|
| Arauca | Arauca | 294.206 | 7 |
| Casanare | Yopal | 435.195 | 19 |
| Meta | Villavicencio | 1.063.454 | 29 |
| Vichada | Puerto Carreño | 112.958 | 4 |
| Total Región Orinoquía | | 1.905.813 | 59 |

Fuente: Proyecciones censo Nacional de Población 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística

4.2.2.5. Región Pacífica

La región Pacífica está localizada en la parte occidental del país y actualmente la conforman cuatro departamentos. Presenta un área de 83.130 Km², los cuales representan el 7% de los 1.141.748 Km² que comprende el total del territorio nacional.

Gráfico 101. Mapa de la Región Pacífica



Tabla 45. Población por departamento región Pacífica

| Departamento | Capital | Población departamento (hab- 2020) | No. de Municipios |
|------------------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| Choco | Quibdó | 544.764 | 30 |
| Valle del Cauca | Santiago de Cali | 4.532.152 | 42 |
| Cauca | Popayán | 1.491.937 | 42 |
| Nariño | San Juan de Pasto | 1.627.589 | 64 |
| Total Región Pacífica | | 8.196.442 | 178 |

Fuente: Censo Nacional de Población 2018. Departamento Administrativo Nacional de Estadística

4.2.3. Pasos para realizar el análisis costo beneficio del reúso del agua residual tratada

Una vez definidos los supuestos anteriores, a continuación, se presentan los pasos realizados para estimar el costo beneficio del reúso de agua residual tratada.

4.2.3.1. Estimación de la demanda hídrica para uso doméstico

Con base en el consumo promedio residencial del servicio público domiciliario de acueducto, los suscriptores (residenciales) y el nivel de pérdidas de agua, se estimó la producción para uso doméstico de agua en cada región.

4.2.3.2. Estimación de la demanda hídrica para otros usos

Estimada la producción de agua para uso doméstico, se realizó una extrapolación a los otros usos del agua para determinar la demanda hídrica por región.

Para ello, se emplearon los porcentajes de distribución de la demanda hídrica contenida en el Estudio Nacional del Agua (ENA 2018) y el metro cúbico de agua producido por región.

De este modo, con base en el porcentaje de uso del sector doméstico de cada región, y los metros cúbicos de agua potable producidos también en cada región, para determinar la demanda de los otros usos, se aplicó la siguiente fórmula:

Demanda Hídrica por región

$$= m^3 \text{ de agua producidos por región} \times \left(\frac{\text{Demanda Hídrica por uso}}{\text{Demanda Hídrica para uso doméstico por región}} \right)$$

De esta manera, se estimó la cantidad de agua requerida por cada uso a nivel nacional. (Tabla 47)

Las siguientes tablas presentan el valor porcentual del ENA 2018 y la estimación de los metros cúbicos de la demanda de agua por cada uso.

Tabla 46. Distribución (%) la demanda hídrica sectorial por Región

| % Demanda por sector | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|----------------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|
| Agricultura | 52,28% | 11,99% | 42,51% | 34,77% | 57,00% |
| Pecuario | 5,75% | 27,71% | 8,25% | 10,30% | 4,01% |
| Piscícola | 5,48% | 17,00% | 7,76% | 13,35% | 3,54% |
| Industria | 1,69% | 2,03% | 3,24% | 2,73% | 1,23% |
| Construcción | 0,43% | 0,02% | 1,36% | 1,27% | 0,05% |
| Minería | 1,76% | 0,19% | 1,70% | 0,08% | 11,10% |
| Hidrocarburos | 0,05% | 8,25% | 0,47% | 8,93% | 0,00% |
| Energía | 24,75% | 0,00% | 25,43% | 22,93% | 10,68% |
| Doméstico | 7,07% | 29,65% | 7,56% | 4,20% | 11,58% |

| % Demanda por sector | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|----------------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|
| Servicios | 0,75% | 3,16% | 1,72% | 1,43% | 0,80% |
| Total | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Fuente: Estudio Nacional del Agua. IDEAM. 2018

Tabla 47. Distribución de la demanda hídrica (m³) sectorial por Región

| Demanda (m ³ /año) por sector | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|--|----------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Agricultura | 2.581.899.745 | 14.176.038 | 12.877.857.750 | 817.762.093 | 1.646.050.616 |
| Pecuario | 283.969.463 | 32.762.137 | 2.499.231.391 | 242.247.615 | 115.801.105 |
| Piscícola | 270.635.245 | 20.099.471 | 2.350.792.193 | 313.981.131 | 102.228.407 |
| Industria | 83.462.329 | 2.400.113 | 981.516.328 | 64.207.377 | 35.520.040 |
| Construcción | 21.235.977 | 23.646 | 411.994.508 | 29.869.366 | 1.443.904 |
| Minería | 86.919.349 | 224.641 | 514.993.135 | 1.881.535 | 320.546.699 |
| Hidrocarburos | 2.469.300 | 9.754.155 | 142.380.455 | 210.026.330 | 0 |
| Energía | 1.222.303.341 | 0 | 7.703.691.427 | 539.294.932 | 308.417.905 |
| Doméstico | 349.158.975 | 35.055.841 | 2.290.204.766 | 98.780.581 | 334.408.178 |
| Servicios | 37.039.495 | 3.736.137 | 521.051.878 | 33.632.436 | 23.102.465 |
| Total | 4.939.093.219 | 118.232.180 | 30.293.713.832 | 2.351.683.396 | 2.887.519.318 |

Fuente: Consorcio N&V - Caltiz

4.2.3.3. Cuantificación del agua potable según su uso

Posteriormente de la cuantificación del agua consumida (Tabla 47), a partir de la tarifa promedio por metro cúbico del servicio público domiciliario de acueducto de cada región (ver Tabla 51), se determinó el valor del agua potable empleada aquellas actividades que, con base en los supuestos iniciales, consumen agua potable para sus procesos, adicional al agua empleada para uso doméstico. Esto es, el sector agrícola y el sector industrial. El valor del agua potable en estas actividades se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 48. Valor del agua potable empleada por uso y por Región

| Valor del agua (\$/año) por sector | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|------------------------------------|---------------|-----------------|---------------|------------------|-----------------|
| Agricultura | 4.617.376 | 15.482 | 15.753.063 | 853.919 | 1.523.247 |
| Industria | 149.261 | 2.621 | 1.200.657 | 67.046 | 32.870 |
| Doméstico | 624.423 | 38.284 | 2.801.533 | 103.148 | 309.460 |

Cifras en millones de pesos de 2018

Fuente: Consorcio N&V - Caltiz.

Las cifras anteriores constituyen el punto de partida del análisis costo beneficio consistente en la situación inicial donde no se efectúa el reúso del agua, es decir “no hacer nada” puesto que el agua para los usos parte del supuesto de emplear agua potable.

4.2.3.4. Estimación de la oferta y demanda del agua empleada para reúso

Teniendo en cuenta la premisa básica de que el reúso se realiza al agua que es tratada previamente en un sistema de tratamiento de aguas residuales, la oferta de agua se obtuvo a partir del consumo de agua residencial y no residencial. Este consumo, fue ajustado por el índice de agua no contabilizada (IANC) promedio de cada región y corregido por un factor del 80% con el fin de incluir un coeficiente de retorno. El valor obtenido corresponde entonces al volumen de agua residual que ingresa al sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR), el cual se constituye como la oferta de agua para ser objeto de reúso. Es preciso aclarar que, para estos cálculos no se consideraron los volúmenes de pérdidas que se podrían generar en las actividades de tratamiento de agua residual.

La demanda del sector agrícola, bajo el entendido que se empleará totalmente para riego (drenaje agrícola), será potencialmente el 100% de la misma. Para el caso del sector industrial, dada la heterogeneidad de estas actividades, su valor es variable y no es posible asignar un parámetro fijo de demanda de agua proveniente del reúso.

Por lo tanto, el modelo matemático empleado para los cálculos permite simular escenarios de diferentes demandas de reúso de agua residual tratada. Para efectos de los cálculos en el presente informe, se han efectuado las estimaciones a partir de un porcentaje de agua residual tratada para el sector industrial, del 20% del agua que consumen.

La Tabla 49 presenta la oferta y demanda de agua para reúso por cada región.

Tabla 49. Oferta y demanda del agua empleada para el Reúso por Región

| Oferta y demanda (m ³ /año) para Reúso | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|---|---------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|
| Oferta PTAR | 199.055.242 | 13.703.885 | 1.070.768.880 | 57.154.444 | 186.369.836 |
| Reúso Agricultura | 2.581.899.745 | 14.176.038 | 12.877.857.750 | 817.762.093 | 1.646.050.616 |
| Reúso Industria* | 16.692.466 | 480.023 | 196.303.266 | 12.841.475 | 7.104.008 |

* Para efectos de cálculo se asumió el 20% del agua industrial consumida

Cifras en millones de pesos de 2018

Fuente: Consorcio N&V - Caltiz.

De la tabla anterior, se puede observar que, dada la demanda de agua del sector agrícola, ésta se encuentra por encima de la oferta generada por los sistemas de tratamiento de agua residual de cada región. Por lo tanto, para efectos de cálculos, de la oferta de agua para reúso, se asigna primero el agua para el sector industrial. Posteriormente, el valor remanente de oferta se asigna en su totalidad para agricultura.

Esto genera que el agua demandada para el sector agrícola empleará una parte de agua residual tratada (reúso), en función de la oferta del agua residual tratada. La cantidad faltante, con base en los supuestos planteados, empleará agua potable.

4.2.3.5. Estimación del valor del agua residual tratada para reúso

Para aplicar el tipo de tecnología de tratamiento de aguas residuales, ésta se seleccionó, con base en la cantidad de municipios y habitantes que conforman cada región, para posteriormente estimar el número promedio de habitantes de cada uno de ellos (Habitantes/municipio). Esta información se calculó a partir del Censo DANE 2018.

Como se mencionó, para este análisis se estimarán los costos del agua residual tratada, a partir de dos tecnologías. La primera, compuesta de una laguna anaerobia + laguna facultativa + laguna de maduración (LA+LF+LM), se empleará para poblaciones de hasta 10.000 habitantes. La segunda tecnología, será la de lodos activados con aireación extendida y se empleará para poblaciones con más de 10.000 habitantes.

Con base en las funciones estimadas por medio del método de mínimos cuadrados ordinarios, se puede estimar el CAPEX y el OPEX, en función de la población promedio de cada región. Sin embargo, dado el alto costo que representa la inversión de cada una de estas dos tecnologías, no se incluirá el CAPEX y se asumirá que su valor será aportado por un tercero (nación, departamento o municipio). Bajo este entendido, solamente se incluirá el valor de los costos de operación y mantenimiento de cada tecnología.

Obtenido el valor anual de la operación por cada región en función de la tecnología asignada en cada uno de ellos, su valor se dividió por la cantidad de los metros cúbicos promedio vertidos durante el año, los cuales se calcularon como una proporción del agua consumida, corregida por un factor del 80% con el fin de incluir un coeficiente de retorno. De esta forma, se obtuvo el valor estimado por

metro cúbico de la operación en cada sistema de tratamiento, como se observa en la Tabla 50.

Tabla 50. Valor de la operación del sistema de tratamiento por región y tecnología

| Concepto | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Promedio hab./municipio | 41.382 | 9.496 | 22.307 | 22.638 | 29.107 |
| Funciones Costos | Región Caribe (Lodos Act.) | Región Amazonía (LA+LF+LM) | Región Andina (Lodos Act.) | Región Orinoquía (Lodos Act.) | Región Pacífico (Lodos Act.) |
| Constante 1 | 13.526 | 6.770 | 13.526 | 13.526 | 13.526 |
| Constante 2 | 1.764.394.611 | 23.415.445 | 1.764.394.611 | 1.764.394.611 | 1.764.394.611 |
| VALOR OPEX (\$ 2018) | 2.324.141.426 | 87.702.638 | 2.066.127.996 | 2.070.601.969 | 2.158.105.591 |
| m ³ Vertidos | 199.055.242 | 13.703.885 | 1.070.768.880 | 57.154.444 | 186.369.836 |
| \$/m³ (\$2018) | 11,68 | 6,40 | 1,93 | 36,23 | 11,58 |

Fuente: Consorcio N&V - Caltiz

Es importante tener en cuenta que el agua residual tratada que será empleada para el reuso, debe ser objeto de distribución por medio de redes, desde el sistema de tratamiento de aguas residuales hasta el sitio del reuso, ya sea agrícola como industrial.

Debido a que estas redes expresas no existen dentro del catastro de redes de la persona prestadora de los servicios públicos domiciliarios que opera en cada municipio, es necesario cuantificar tanto su inversión, como su operación y mantenimiento. Estos costos varían según las condiciones particulares de la ubicación (topografía, distancia) de cada uno de los sitios receptores del agua residual tratada.

Para estimar este valor, se asumió el mismo principio empleado para determinar la tarifa definido en la Resolución CRA No. 759 de 2016 "Por la cual se establecen los requisitos generales aplicables a los contratos que suscriban los prestadores de servicios públicos de acueducto y/o alcantarillado, para el uso e interconexión de redes y para los contratos de suministro de agua potable e interconexión; se señala la metodología para determinar la remuneración y/o peaje correspondiente y se establecen las reglas para la imposición de servidumbres de interconexión".

En este caso, se cuantificaron los componentes del servicio público domiciliario de alcantarillado empleados para llevar el agua residual tratada hasta

su sitio de destino (vertimiento al cuerpo de agua receptor), que incluye las actividades de los subsistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales tratadas. Teniendo en cuenta que no se tiene información relacionada con la distancia hasta el punto de entrega al usuario final (industria o sector agrícola), se asume que el costo incluido en la tarifa para transportar el agua residual tratada desde la PTAR hasta el vertimiento se puede asemejar con el costo de transporte al usuario final.

Por lo tanto, se requieren las actividades de los subsistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de las aguas residuales tratadas.

Bajo este supuesto, la tarifa a considerar será la del servicio público domiciliario de alcantarillado promedio de cada región, más el valor de la operación del sistema de tratamiento de aguas residuales. La Tabla 51 siguiente presenta el valor de la tarifa del reúso de agua residual tratada por región.

Tabla 51. Valor del metro cúbico de agua empleada para Reúso por región

| Tarifa \$ 2018 | Región Caribe (Lodos Act.) | Región Amazonía (LA+LF+LM) | Región Andina (Lodos Act.) | Región Orinoquía (Lodos Act.) | Región Pacífico (Lodos Act.) |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Tarifa alcantarillada. sin tratamiento | 900,97 | 885,79 | 634,53 | 552,12 | 734,74 |
| \$/m ³ Tratamiento | 11,68 | 6,40 | 1,93 | 36,23 | 11,58 |
| Tarifa alcantarillado con tratamiento | 912,64 | 892,19 | 636,46 | 588,34 | 746,32 |

Fuente: Consorcio N&V - Caltiz

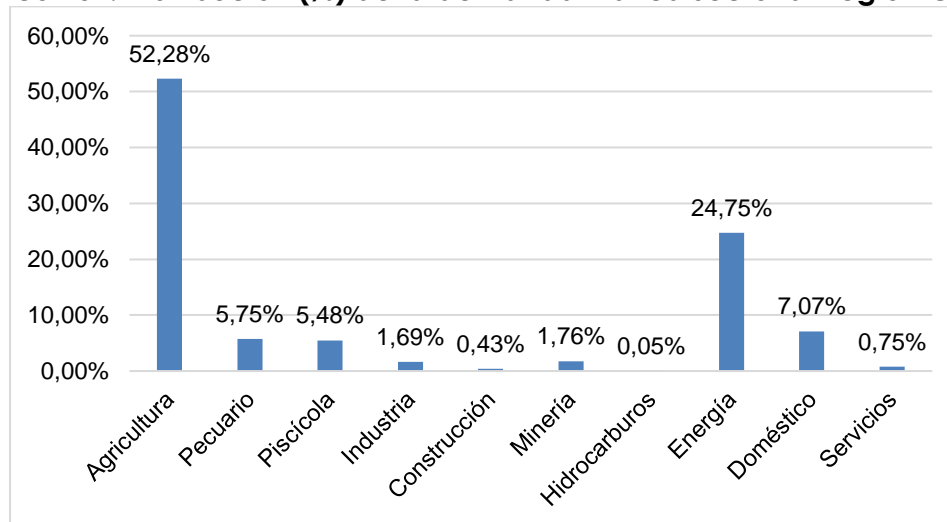
En el anexo 5 se encuentra el documento en Excel con los cálculos realizados para el análisis costo beneficio.

4.2.4. Análisis costo beneficio por región

Una vez obtenida la totalidad de la información con base en los pasos anteriores, se realiza el análisis costo beneficio para cada una de las regiones de Colombia.

La demanda hídrica de las regiones por actividad productiva se presenta a continuación.

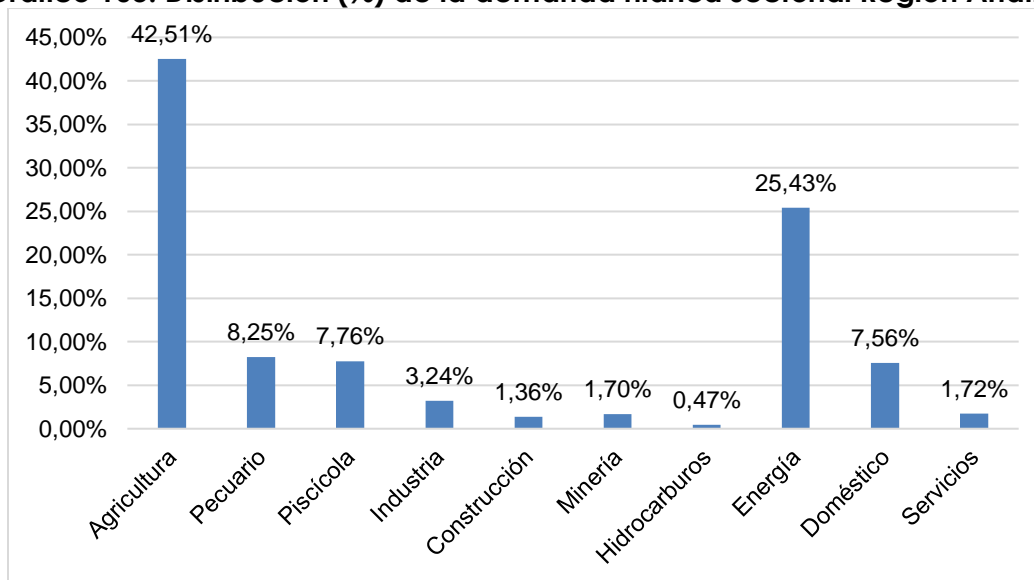
Gráfico 102. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Caribe



Fuente: Estudio Nacional del agua (ENA) 2018

La mayor demanda de agua en la región caribe es del sector agrícola (52,28%), seguido del de energía (24,75%). El uso doméstico ocupa el tercer lugar con un 7,07%.

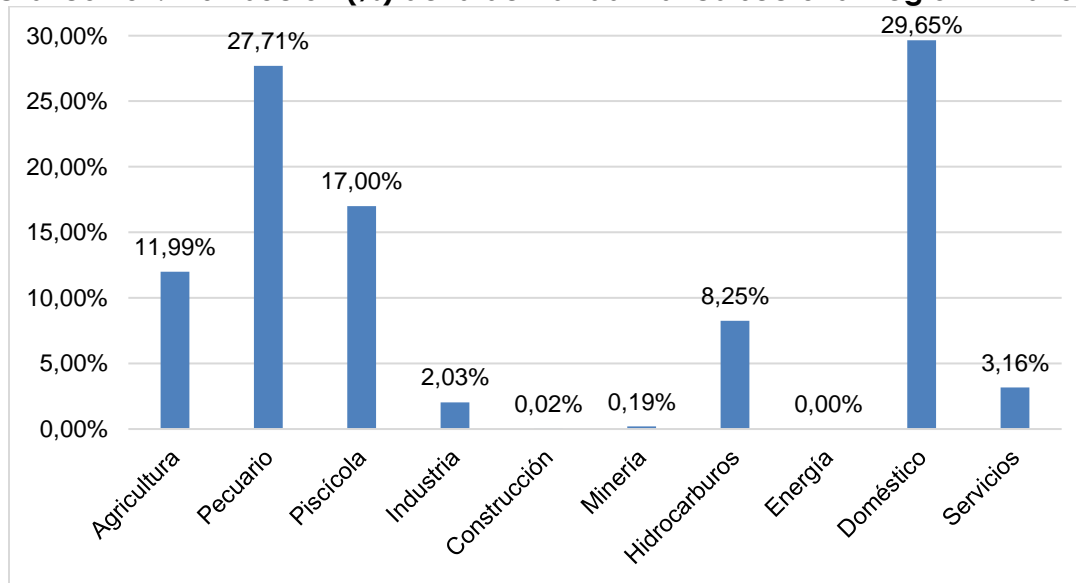
Gráfico 103. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Andina



Fuente: Estudio Nacional del agua (ENA) 2018

La mayor demanda de agua en la región andina es del sector agrícola (42,51%), seguido del de energía (25,43%). El uso doméstico ocupa el cuarto lugar con un 7,56%.

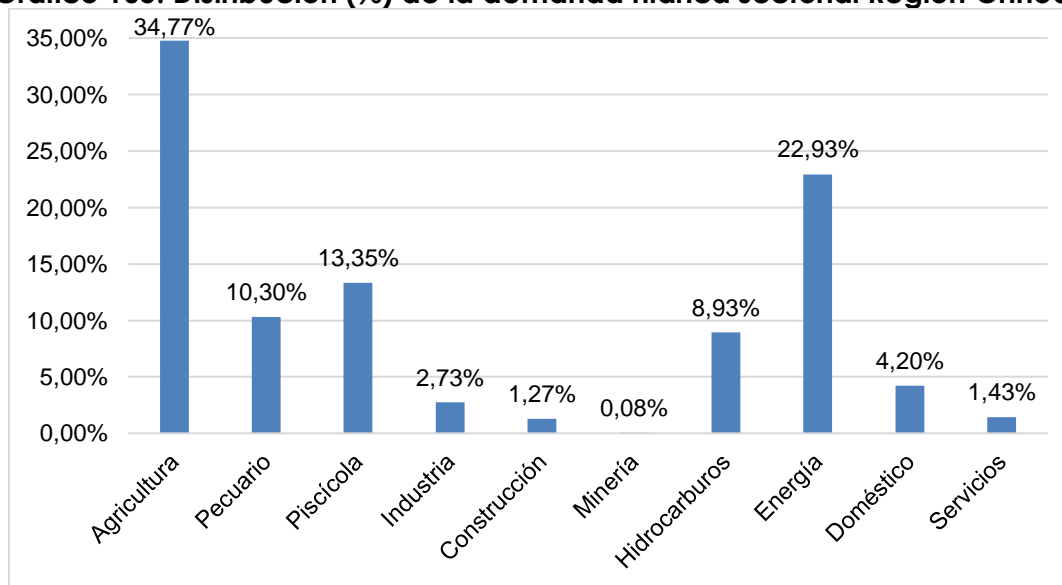
Gráfico 104. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Amazónica



Fuente: Estudio Nacional del agua (ENA) 2018

La mayor demanda de agua en la región amazónica es del sector doméstico (29,65%), seguido del pecuario (27,71%).

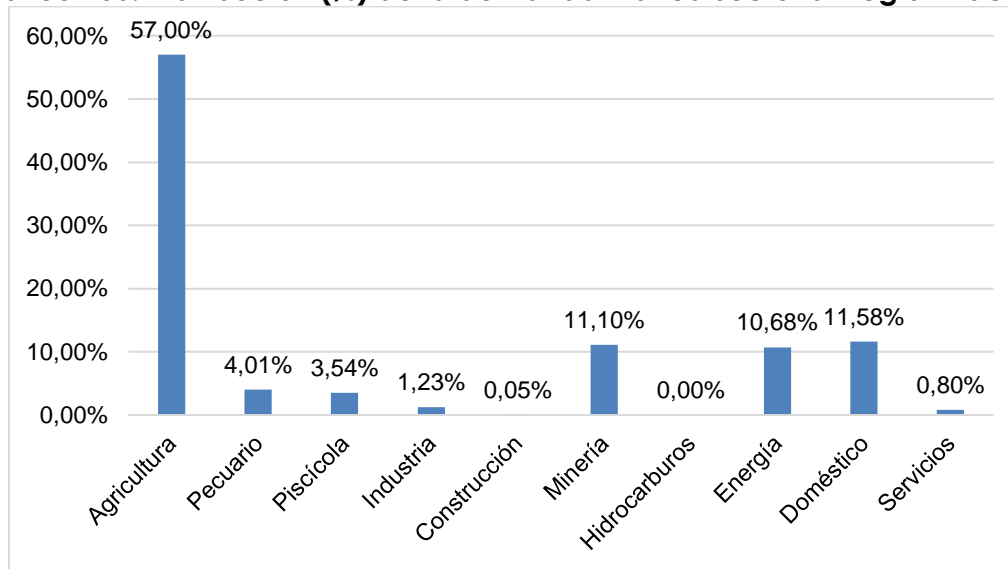
Gráfico 105. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Orinoquía.



Fuente: Estudio Nacional del agua (ENA) 2018

La mayor demanda de agua en la región de la Orinoquia es del sector agrícola (34,77%), seguido del de energía (22,93%). El uso doméstico ocupa el sexto lugar con un 4,20%.

Gráfico 106. Distribución (%) de la demanda hídrica sectorial Región Pacífica

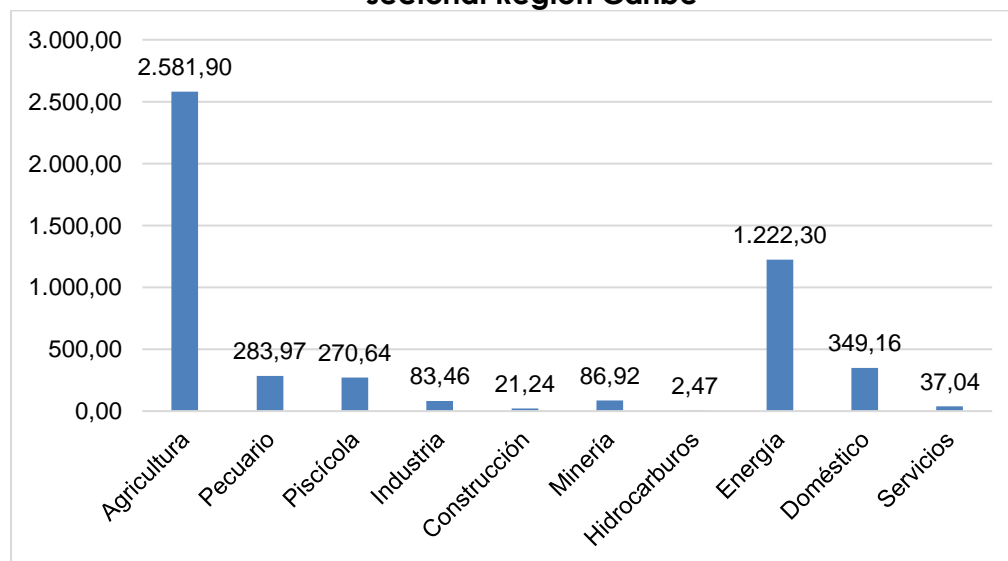


Fuente: Estudio Nacional del agua (ENA) 2018

La mayor demanda de agua en la región pacífica se encuentra es del sector agrícola (57,00%), seguido del doméstico (11,58%).

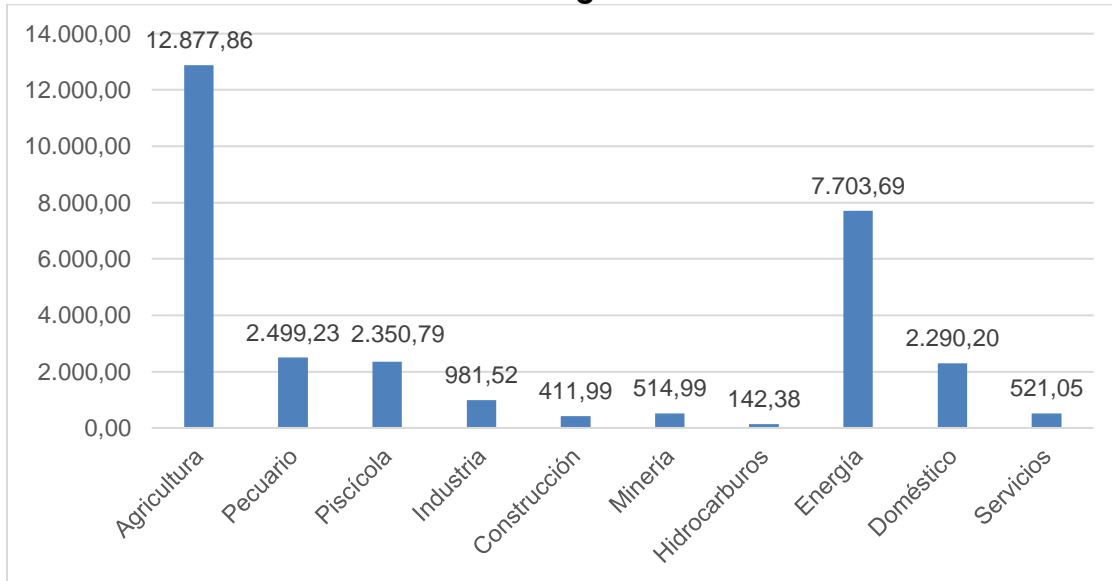
Una vez estimados los consumos por uso de cada actividad, a partir de los datos de consumo doméstico, los siguientes gráficos presentan la demanda en millones de metros cúbicos al año para cada región.

Gráfico 107. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Caribe



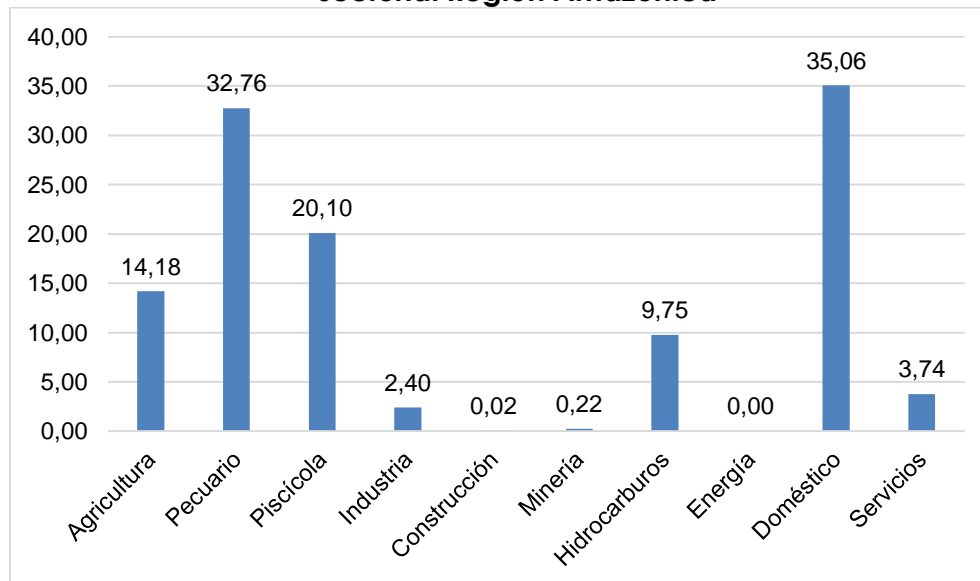
Fuente: Consorcio N&V-Caltiz a partir del ENA 2018

Gráfico 108. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Andina



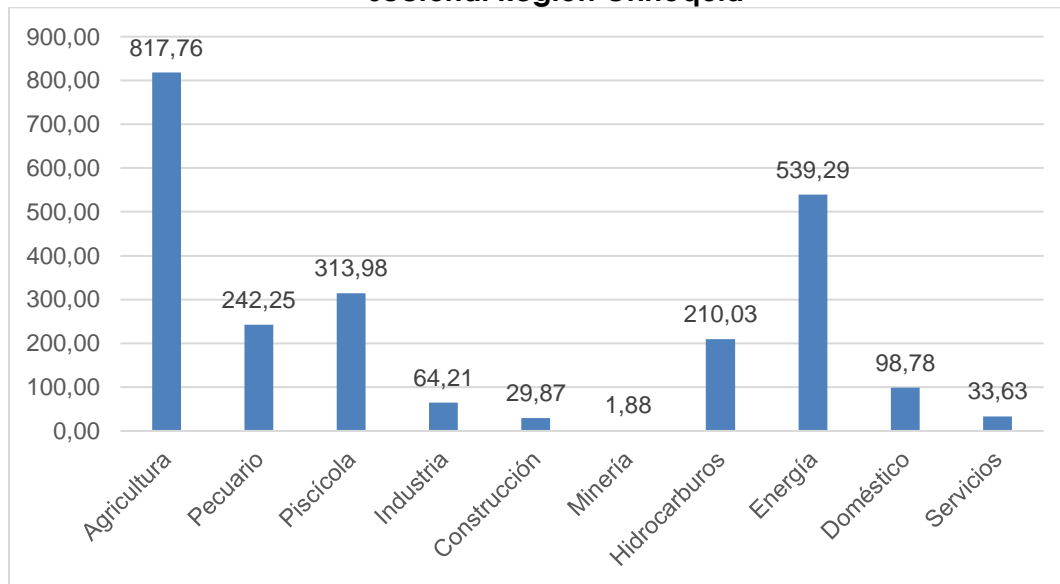
Fuente: Consorcio N&V-Caltiz a partir del ENA 2018

Gráfico 109. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Amazónica



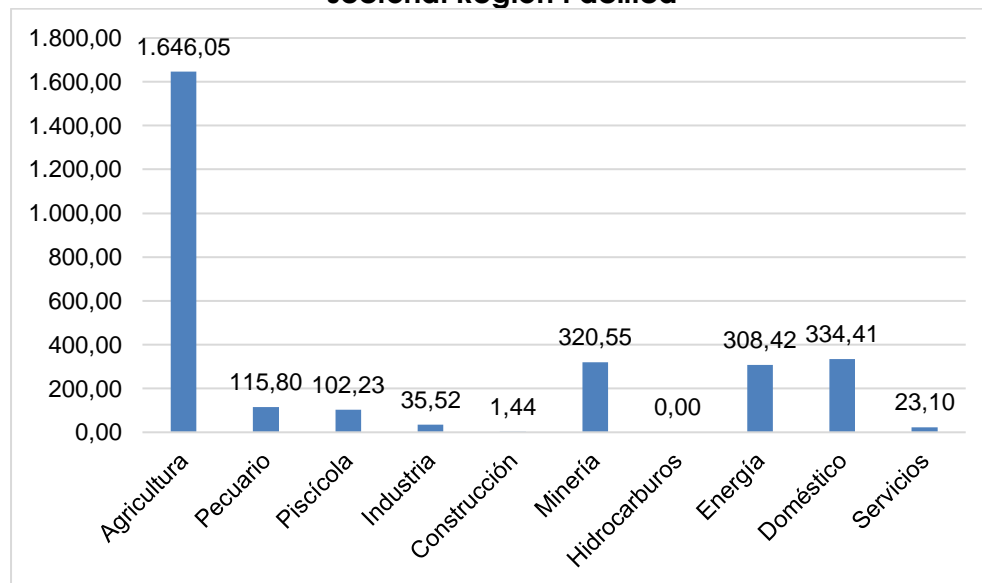
Fuente: Consorcio N&V-Caltiz a partir del ENA 2018

Gráfico 110. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Orinoquía



Fuente: Consorcio N&V-Caltiz a partir del ENA 2018

Gráfico 111. Distribución en millones de metros cúbicos de la demanda hídrica sectorial Región Pacífica



Fuente: Consorcio N&V-Caltiz a partir del ENA 2018

Con base en la demanda por tipo de uso y la estimación de la cantidad de agua residual que será objeto de tratamiento, de acuerdo con lo definido en el numeral 4.2.3.4 del presente documento, se calcula el balance hídrico de la región en la Tabla 52. Como se mencionó, la demanda hídrica del sector agrícola será potencialmente el 100% de la misma. Para el caso del sector industrial, para efectos de los cálculos, se asumió que el 20% del agua consumida será objeto de reúso.

Tabla 52. Balance hídrico por región

| Balance Hídrico (m ³ /año) | | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|---------------------------------------|---------------------|---------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|
| Demanda Hídrica Agricultura | | 2.581.899.745 | 14.176.038 | 12.877.857.750 | 817.762.093 | 1.646.050.616 |
| Demanda Hídrica Industria | | 83.462.329 | 2.400.113 | 981.516.328 | 64.207.377 | 35.520.040 |
| Oferta PTAR para Reúso | | 199.055.242 | 13.703.885 | 1.070.768.880 | 57.154.444 | 186.369.836 |
| Consumo Industria | Agua potable | 66.769.863 | 1.920.091 | 785.213.063 | 51.365.902 | 28.416.032 |
| | Reúso Agua* | 16.692.466 | 480.023 | 196.303.266 | 12.841.475 | 7.104.008 |
| Consumo Agricultura | Agua potable | 2.399.536.968 | 952.176 | 12.003.392.136 | 773.449.124 | 1.466.784.788 |
| | Reúso Agua | 182.362.776 | 13.223.863 | 874.465.614 | 44.312.968 | 179.265.828 |

*Para efectos de cálculo se asumió el 20% del agua industrial consumida.

Fuente: Consorcio N&V Caltiz

A partir de la demanda hídrica según su uso y la tarifa de agua potable, se realiza la estimación del costo por actividad industrial y agrícola. Esto con el fin de determinar el costo del escenario inicial donde no se emplea el reúso de agua ("no hacer nada").

Tabla 53. Costo del uso del agua para las actividades industrial y agrícola sin reúso de agua

| Concepto | Región Caribe | Región Amazonia | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Tarifa Agua Potable | 1.788,36 | 1.092,09 | 1.223,27 | 1.044,21 | 925,39 |
| Consumo Industria | 83.462.329 | 2.400.113 | 981.516.328 | 64.207.377 | 35.520.040 |
| Costo Industria SIN REÚSO | 149.260.994.482 | 2.621.141.855 | 1.200.656.854.879 | 67.046.260.776 | 32.870.057.713 |
| Consumo Agricultura | 2.581.899.745 | 14.176.038 | 12.877.857.750 | 817.762.093 | 1.646.050.616 |
| Costo Agricultura SIN REÚSO | 4.617.375.616.269 | 15.481.522.580 | 15.753.062.623.739 | 853.918.859.776 | 1.523.246.576.948 |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

Para estimar el costo del reúso de agua para las actividades industrial y agrícola empleando agua residual tratada, se debe tener en cuenta que la oferta de esta agua está en función del volumen promedio efectivamente tratado. Debido a que la oferta es inferior a la demanda, en especial la del sector agrícola, una parte del agua empleará, con base en los supuestos planteados, agua potable para su uso una vez se agote la totalidad del agua residual tratada.

La Tabla 54, con base en el balance hídrico, se efectúa la cuantificación del costo por actividad industrial y agrícola, empleando el reúso del agua.

Tabla 54. Costo del uso del agua para las actividades industrial y agrícola empleando reúso de agua residual tratada

| Concepto | | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|--|--------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Tarifa Agua Potable (%/m ³) | | 1.788,36 | 1.092,09 | 1.223,27 | 1.044,21 | 925,39 |
| Tarifa Reúso Agua (%/m ³) | | 912,64 | 892,19 | 636,46 | 588,34 | 746,32 |
| Valor Consumo Industria (m ³ /año) | Agua potable | 119.408.795.585 | 2.096.913.484 | 960.525.483.903 | 53.637.008.621 | 26.296.046.170 |
| | Reúso Agua* | 15.234.288.994 | 428.272.129 | 124.940.006.346 | 7.555.199.573 | 5.301.838.583 |
| Total costo Industria con Reúso de Agua (%/año) | | 134.643.084.579 | 2.525.185.613 | 1.085.465.490.249 | 61.192.208.194 | 31.597.884.753 |
| Consumo Agricultura (m ³ /año) | Agua potable | 4.291.244.658.396 | 1.039.862.495 | 14.683.357.409.832 | 807.646.625.031 | 1.357.354.923.188 |
| | Reúso Agua | 166.432.405.174 | 11.798.217.827 | 556.566.081.601 | 26.071.250.219 | 133.789.051.744 |
| Total, costo Agricultura con Reúso de Agua (%/año) | | 4.457.677.063.570 | 12.838.080.323 | 15.239.923.491.433 | 833.717.875.249 | 1.491.143.974.932 |

Para efectos de cálculo se asumió el 20% del agua industrial consumida.

Fuente: Consorcio N&V Caltiz

De este modo, se cuenta con el valor del agua para las actividades industrial y agrícola sin empleo y con empleo del agua que se reúsa a partir del agua residual tratada. Con esta información se realiza el cálculo del costo beneficio.

El cálculo comprende dos aspectos. Por un lado, el costo evitado por realizar las actividades de reúso de agua residual tratada, reflejado en un beneficio para la sociedad al generarse menores costos de transacción en las actividades industrial y agrícolas.

El segundo cálculo, se realiza con base en el balance hídrico. En la medida que se emplee el agua residual tratada para reúso en cada actividad, se disminuye el estrés hídrico de las cuencas en dos sentidos. El primero, consiste en dejar de emplear una parte del caudal de la fuente para los usos industrial y agrícola.

El segundo, beneficia a los municipios que se encuentran aguas abajo del municipio que genera las descargas en la cuenca, donde los primeros, además de contar con un potencial caudal mayor para captar agua, la fuente no presenta un mayor grado de contaminación, lo que se traduce en menores costos de potabilización de agua (PTAP) para consumo humano.

Las tablas siguientes, presentan los costos evitados por efecto de emplear agua residual tratada para reúso en las actividades industrial y agrícola.

Tabla 55. Costos evitados por reúso de agua en el sector industrial

| Industria | Total Nacional | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Costos sin Reúso | 1.452.455.309.705 | 149.260.994.482 | 2.621.141.855 | 1.200.656.854.879 | 67.046.260.776 | 32.870.057.713 |
| Costos con Reúso | 1.315.423.853.388 | 134.643.084.579 | 2.525.185.613 | 1.085.465.490.249 | 61.192.208.194 | 31.597.884.753 |
| Costos con Reúso/Costos sin Reúso | 90,57% | 90,21% | 96,34% | 90,41% | 91,27% | 96,13% |
| Costos Evitados por REÚSO | 137.031.456.317 | 14.617.909.903 | 95.956.242 | 115.191.364.630 | 5.854.052.582 | 1.272.172.960 |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

Tabla 56. Costos evitados por reúso de agua en el sector Agrícola

| Agricultura | Total Nacional | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Costos sin Reúso | 22.763.085.199.311 | 4.617.375.616.269 | 15.481.522.580 | 15.753.062.623.739 | 853.918.859.776 | 1.523.246.576.948 |
| Costos con Reúso | 22.035.300.485.508 | 4.457.677.063.570 | 12.838.080.323 | 15.239.923.491.433 | 833.717.875.249 | 1.491.143.974.932 |
| Costos con Reúso/Costos sin Reúso | 96,80% | 96,54% | 82,93% | 96,74% | 97,63% | 97,89% |
| Costos Evitados por REÚSO | 727.784.713.804 | 159.698.552.700 | 2.643.442.257 | 513.139.132.306 | 20.200.984.526 | 32.102.602.016 |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

Tabla 57. Costos evitados totales por reúso de agua residual tratada

| Costos Evitados por REÚSO | Total Nacional | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|---------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Industria | 137.031.456.317 | 14.617.909.903 | 95.956.242 | 115.191.364.630 | 5.854.052.582 | 1.272.172.960 |
| Agricultura | 727.784.713.804 | 159.698.552.700 | 2.643.442.257 | 513.139.132.306 | 20.200.984.526 | 32.102.602.016 |
| Total | 864.816.170.121 | 174.316.462.602 | 2.739.398.499 | 628.330.496.936 | 26.055.037.109 | 33.374.774.976 |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

De la Tabla 57, se puede observar que los beneficios, expresados en costos evitados, para el sector industrial y agrícola en la región caribe son del orden de \$14,6 y \$159,7 mil millones de pesos (en cifras de 2018) respectivamente. El valor total del beneficio en la región es de \$174,3 mil millones de pesos.

En relación con la disminución del estrés hídrico de las cuencas hidrográficas de la región caribe, se tiene que estas reducen una demanda potencial de al menos 199 millones de metros cúbicos anuales (Tabla 52).

Para la región andina, los beneficios, expresados en costos evitados, para el sector industrial y agrícola son del orden de \$115,9 y \$513,1 mil millones de pesos (en cifras de 2018) respectivamente. El valor total del beneficio en la región es de \$628,3 mil millones de pesos.

En relación con la disminución del estrés hídrico de las cuencas hidrográficas de la región, se tiene que estas reducen una demanda potencial de al menos 1.071 millones de metros cúbicos anuales.

En la región Amazónica para el sector industrial y agrícola son del orden de \$95,9 millones de pesos y \$2,6 mil millones de pesos (en cifras de 2018) respectivamente. El valor total del beneficio en la región es de \$2,7 mil millones de pesos.

En relación con la disminución del estrés hídrico de las cuencas hidrográficas de la región, se tiene que estas reducen una demanda potencial de al menos 13,7 millones de metros cúbicos anuales.

En la región de la Orinoquia los beneficios, expresados en costos evitados, para el sector industrial y agrícola son del orden de \$5,8 y \$20,2 mil millones de pesos (en cifras de 2019) respectivamente. El valor total del beneficio en la región es de \$26 mil millones de pesos.

En relación con la disminución del estrés hídrico de las cuencas hidrográficas de la región, se tiene que estas reducen una demanda potencial de al menos 57 millones de metros cúbicos anuales.

Y, por último, para la región pacífica se puede observar que los beneficios, expresados en costos evitados, para el sector industrial y agrícola son del orden de \$1,2 y \$32,1 mil millones de pesos (en cifras de 2019) respectivamente. El valor total del beneficio en la región es de \$33,3 mil millones de pesos.

En relación con la disminución del estrés hídrico de las cuencas hidrográficas de la región, se tiene que estas reducen una demanda potencial de al menos 186 millones de metros cúbicos anuales.

Por último, es relevante también determinar la proporción del agua que se ahorra debido a la actividad del reúso del agua residual tratada, puesto que, en épocas de sequía en las regiones, se requiere realizar un uso racional del recurso.

En la Tabla 58 se presenta el porcentaje de agua ahorrada por la actividad de reúso en cada región. Se destaca la región de la Amazonía, que presenta un ahorro cercano al 83%, debido a que la mayor demanda se encuentra en el sector doméstico y por ende llegaría una gran cantidad de agua a la PTAR.

En las regiones Caribe, Andina y Orinoquía, se observa un ahorro similar de ahorro dentro del rango comprendido entre el 6,5% (Orinoquía) y el 7,7% (Andina). La región caribe se encuentra en el medio de estas dos regiones con un 7,47%. También es de destacar el ahorro de la región Pacífica con un porcentaje superior al 10%.

Tabla 58. Porcentaje de ahorro de agua por la actividad de reúso

| Región | Demanda de agua anual sector industrial y agrícola | Oferta Agua tratada para Reúso | Porcentaje de ahorro de la demanda de agua |
|-----------|--|--------------------------------|--|
| Caribe | 2.665.362.074 | 199.055.242 | 7,47% |
| Amazonía | 16.576.152 | 13.703.885 | 82,67% |
| Andina | 13.859.374.078 | 1.070.768.880 | 7,73% |
| Orinoquía | 881.969.470 | 57.154.444 | 6,48% |
| Pacífico | 1.681.570.656 | 186.369.836 | 11,08% |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

4.3. Conclusiones

Con base en la información analizada anteriormente, a continuación, se presentan las principales conclusiones de este informe:

4.3.1.1. Técnicas para reúso implementarse en Colombia

- Existe variedad de técnicas/tecnologías de tratamiento de aguas residuales para su reúso dependiendo del tipo de agua residual a tratar y su aprovechamiento. Sin embargo, es importante analizar aquellas que tengan factibilidad para ser incorporadas de manera más fácil y económica en nuestro medio, ya sea porque existen sistemas de tratamiento de ese tipo operando parcial o totalmente en el país o porque la tecnología ha sido desarrollada con ingeniería local o de manera conjunta con empresas extranjeras.

- Se ha hecho énfasis en tratamientos de aguas residuales con base en series de lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración y en variantes de lodos activados para el uso del agua tratada al sector agrícola, teniendo en cuenta la existencia de este tipo de infraestructura en el país. Así mismo, que son soluciones de bajo costo de instalación y operación en poblaciones menores a 12.500 habitantes. En todo caso, se consideró la alternativa de lodos activados, teniendo en cuenta que las lagunas requieren de un área que no siempre está disponible.
- De igual manera se han analizado alternativas de tratamiento con reúso (hipotético) en el sector doméstico con base en sistemas de lodos activados con aeración extendida con tratamiento terciarios basados en desinfección y remoción de sólidos suspendidos residuales, adicionando un tratamiento avanzado con sistemas de membranas a base de microfiltración o ultrafiltración y Osmosis inversa más desinfección con UV. Estos generan agua tratada para reinyectar a acuíferos, para su posterior uso o para mezclar con agua de otras fuentes superficiales o subterráneas que entran a proceso de potabilización, antes de entregar para uso doméstico. Hay alternativas en el tratamiento secundario que permiten obviar algunos tratamientos terciarios pero que deben pasar necesariamente por el mismo proceso de tratamiento avanzado.
- Las alternativas para reúso industrial dependen de las características del agua residual descargada según el proceso que la origina. En el caso de bebidas y alimentos, generalmente se utilizan sistemas biológicos de tratamiento basados en una combinación de reactores anaerobios y aerobios, unidades de tratamiento terciario con retención de sólidos suspendidos residuales y desinfección, seguidos de un tratamiento avanzado similar al relacionado para uso doméstico. En el tratamiento biológico, se pueden hacer variantes de tecnología de oxidación en el sistema aerobio, que determinan la eliminación de algunas de las unidades de tratamiento terciario, pero deben incluir necesariamente el mismo tipo de tratamiento avanzado basado en membranas y desinfección UV que se especificó en el tratamiento para reúso doméstico.
- La tecnología de tratamiento para reúso industrial al igual que para el reúso doméstico, requiere que sean implementadas por empresas especializadas que tengan experiencia documentada, certificada y comprobable en sistemas de tratamiento similares que operen adecuadamente. En Colombia existen algunas empresas que han incursionado a nivel internacional con el reúso y otras empresas internacionales establecidas o

con representación comercial que se encuentran avanzando con el reuso a este nivel, que pueden garantizar su experiencia para acometer el desarrollo de proyectos de estas características.

- Para las aguas lluvias se utilizan sistemas de captación en techos, o en zonas duras impermeabilizadas o con atrapanieblas. Todos estos sistemas requieren de canalización hacia sistemas de almacenamiento tipo tanque superficiales o enterrados con tratamiento de variada complejidad, para garantizar su potabilidad, antes de su uso para consumo humano o aprovechamiento en riego.
- En Colombia existe capacidad de profesionales y empresas para la ejecución de proyectos de reuso del agua lluvia, por lo que no se identifica como una necesidad contar con ingeniería externa al país para su implementación.

4.3.1.2. Costos de adquisición, operación, mantenimiento y otro tipo de requerimientos que se necesitarían para implementar cada una de las técnicas identificadas.

- Los costos de inversión y operación, así como las áreas para el desarrollo de estas tecnologías, dependerán directamente del tamaño de los proyectos a implementar. Ese tamaño está en función del número de habitantes de las poblaciones o del volumen de producción (si fuesen industriales) de las aguas a tratar, con base en los cuales se determinan los caudales para el dimensionamiento de las PTAR. De igual manera, se deben tener en cuenta las características de los efluentes vertidos, la ubicación geográfica en latitud y altitud y la disponibilidad de área, ente otros. Se tienen sin embargo curvas de costos asociados a tamaños de población y tecnología de tratamiento que permiten dimensionar los costos asociados a la inversión del tratamiento para reuso agrícola y algunos costos de inversión en plantas de tratamiento para casos puntuales de empresas del sector de bebidas.

4.3.1.3. Oferta de proveedores de tecnologías para reuso en las técnicas identificadas

- Las tecnologías a implementar para el tratamiento de aguas residuales para uso agrícola a base de lagunas pueden ser desarrolladas en el país con ingenieros o empresas con formación en el área sanitaria, civil y ambiental. Se cuenta también con investigación y desarrollo en universidades del país con amplios conocimientos en el tema. No requiere de mano de obra especializada para su operación. En cuanto a la tecnología de plantas

compactas con lodos activados, se requiere contratar su implementación con empresas especializadas que hayan tenido experiencia documentada, certificada y comprobable sobre sistemas de tratamiento similares que operen adecuadamente. En Colombia existen empresas nacionales o representantes de Empresas internacionales con experiencia garantizada para el desarrollo de proyectos de estas características.

- Como en el caso de las plantas compactas señaladas para el reúso agrícola, para la implementación de tecnologías en el reúso doméstico (hipotéticamente hablando) se requiere contratar su implementación con empresas especializadas que hayan tenido experiencia documentada, certificada y comprobable sobre sistemas de tratamiento similares que operen adecuadamente. En Colombia existen algunas empresas que han incursionado en el nivel internacional con el reúso y otras empresas internacionales establecidas o con representación comercial que se encuentran avanzando con el reúso a este nivel, que pueden garantizar su experiencia para acometer el desarrollo de proyectos de estas características.
- Estas mismas Empresas pueden desarrollar proyectos para el tratamiento de aguas residuales con destino al uso industrial. De hecho, algunas de ellas ya han elaborado proyectos al interior de industrias para hacer reúso parcial de los efluentes tratados con base en las tecnologías enunciadas en el presente proyecto, en varios países de Latinoamérica.

4.3.1.4. Usos que se le pueden dar al agua residual tratada

- Agua residual doméstica tratada entre otros para:
 - Reúso agrícola (sector cañero, cultivo de palma, plantas que requieran un proceso industrial y no sean de consumo directo).
 - Reúso doméstico en mezcla o combinación con aguas crudas superficiales o subterráneas para su potabilización antes de suministro al consumo doméstico. - caso hipotético pues en Colombia no está permitido.
 - Reúso industrial en generación de energía (Empresas de energía), e áreas de servicios (calderas, refrigeración), torres de enfriamiento, intercambiadores de calor y aseos en diferentes industrias.
 - Reinyección a acuíferos para su posterior extracción y uso en consumo doméstico y agrícola (hipotético, en Colombia está prohibido).

- Agua residual industrial: dependiendo de sus características de origen y tratamiento se pueden direccionar entre otros para:
 - Uso agrícola (riego de cultivos)
 - Uso industrial para la misma empresa en sus áreas de servicios, intercambiadores de calor y torres de enfriamiento, riego de prados, entre otras.
 - Uso industrial para otras empresas en las áreas de servicios, intercambiadores de calor y torres de enfriamiento, riego de prados, entre otras.
 - Uso industrial para generación de energía.
 - Uso industrial como materia prima para cementeras y para preparación de agregados y concretos, entre otros

4.3.1.5. Análisis costo beneficio

- En Colombia, en algunas zonas del país se hace uso de las aguas residuales sin tratamiento previo, las cuales se constituyen en fuente de agua sin costo alguno. En estos casos no es posible realizar análisis costo beneficio. Por tanto, se partió del supuesto que la totalidad de las aguas empleadas para el reúso, previamente han tenido un tratamiento.
- Por región, se obtuvo el costo evitado por el sector industrial y el sector agrícola al usar aguas residuales tratadas, lo cual genera un beneficio para la sociedad y para el ambiente al demandar menores volúmenes de agua de los cuerpos de agua, lo cual reduce el estrés hídrico de las cuencas. Lo anterior se resume en las siguientes tablas:

| Costos Evitados por REÚSO | Región Caribe | Región Amazonía | Región Andina | Región Orinoquía | Región Pacífico |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Industria | 14.617.909.903 | 95.956.242 | 115.191.364.630 | 5.854.052.582 | 1.272.172.960 |
| Agricultura | 159.698.552.700 | 2.643.442.257 | 513.139.132.306 | 20.200.984.526 | 32.102.602.016 |
| Total | 174.316.462.602 | 2.739.398.499 | 628.330.496.936 | 26.055.037.109 | 33.374.774.976 |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

| Región | Demanda de agua anual sector industrial y agrícola | Oferta Agua tratada para Reúso | Porcentaje de ahorro de la demanda de agua |
|--------|--|--------------------------------|--|
| Caribe | 2.665.362.074 | 199.055.242 | 7,47% |

| Región | Demanda de agua anual sector industrial y agrícola | Oferta Agua tratada para Reúso | Porcentaje de ahorro de la demanda de agua |
|-----------|--|--------------------------------|--|
| Amazonía | 16.576.152 | 13.703.885 | 82,67% |
| Andina | 13.859.374.078 | 1.070.768.880 | 7,73% |
| Orinoquía | 881.969.470 | 57.154.444 | 6,48% |
| Pacífico | 1.681.570.656 | 186.369.836 | 11,08% |

Fuente: Consorcio N&V Caltiz. Cifras en pesos de 2018

- El balance hídrico permitió concluir que aquellos municipios ubicados aguas abajo del municipio donde se generan las descargas a los cuerpos de agua y se realizan actividades de reúso, podrán contar con un potencial de caudal mayor de agua. La condición de que las aguas residuales sean tratadas contribuye a la disminución de los costos de tratamiento de agua (PTAP) para consumo humano.
- El análisis costo beneficio permitió concluir que todas las regiones, en diferente grado, tienen beneficios económicos por realizar la actividad de reúso de agua residual tratada.
- Para efectos del análisis costo beneficio se tuvieron en cuenta los costos del servicio de alcantarillado y de tratamiento de las aguas residuales, incluido el costo de transporte hasta el punto de descarga. En la reglamentación de reúso de aguas residuales para actividades económicas (agrícola o industrial) se deben considerar los costos de inversión, operación y mantenimiento de las actividades involucradas en el reúso de agua.

5. CONTEXTUALIZACIÓN DEL REÚSO DE AGUA EN COLOMBIA

El quinto capítulo, corresponde al informe donde se realiza la contextualización y recomendaciones para desarrollar el reúso en Colombia.

En este capítulo se presenta una contextualización del reúso de agua en Colombia donde se tienen en cuenta aspectos económicos, sociales, ambientales y legales. Se presenta tres casos de éxito de reúso de agua en Colombia para uso doméstico, industrial y drenaje agrícola, donde se analiza la normatividad vigente, los costos y características del agua antes y después del reúso, la tecnología utilizada y las dificultades encontradas en cada caso. Y por último a partir de la información recopilada durante el desarrollo de toda la consultoría, se presentan las recomendaciones técnicas, normativas e institucionales necesarias para la implementación del reúso de agua en Colombia.

5.1. Aspectos analizados

5.1.1. Aspectos económicos e institucionales

En los informes anteriores, concretamente con las experiencias de los cinco países objeto de análisis, se revisaron los arreglos institucionales, normativos y operativos relacionados con el reúso del agua residual tratada.

En una de las conclusiones planteadas en el segundo informe de la presente consultoría, se mencionó que cada uno de los países analizados en las experiencias internacionales, cuentan con un organismo central, rector y autónomo, con funciones exclusivas para el desarrollo y la gestión del recurso hídrico. Este es el primer hallazgo a destacar en comparación con el caso colombiano, donde el sector de agua potable y saneamiento básico se encuentra en cabeza de un viceministerio (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico) que forma parte de un Ministerio que se ocupa además de otro sector como es el de Vivienda (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio).

No obstante, si bien en Colombia no existe un organismo (ministerio) dedicado exclusivamente al tema de recurso hídrico, si se cuenta con un marco institucional debidamente constituido y fundamentado en diferentes niveles del nivel ejecutivo de nuestro país.

En el Documento Conpes 3934 de 2018 que trata sobre la *Política de Crecimiento Verde*, dentro del diagnóstico¹²⁴ se menciona lo siguiente: “Se destaca que, a nivel regional persisten problemas de coordinación entre varios de los actores locales, y entre las entidades que funcionan como enlace entre el nivel regional y el nacional (Nupia, 2014). Además, las entidades del Gobierno nacional llegan al territorio de manera desarticulada, en diferentes momentos del tiempo y con agendas de desarrollo productivo local distintas (DNP, 2016). Como resultado, se presenta un gran desgaste institucional, la efectividad de los instrumentos es limitada y por ende la implementación de las políticas es poco exitosa”.

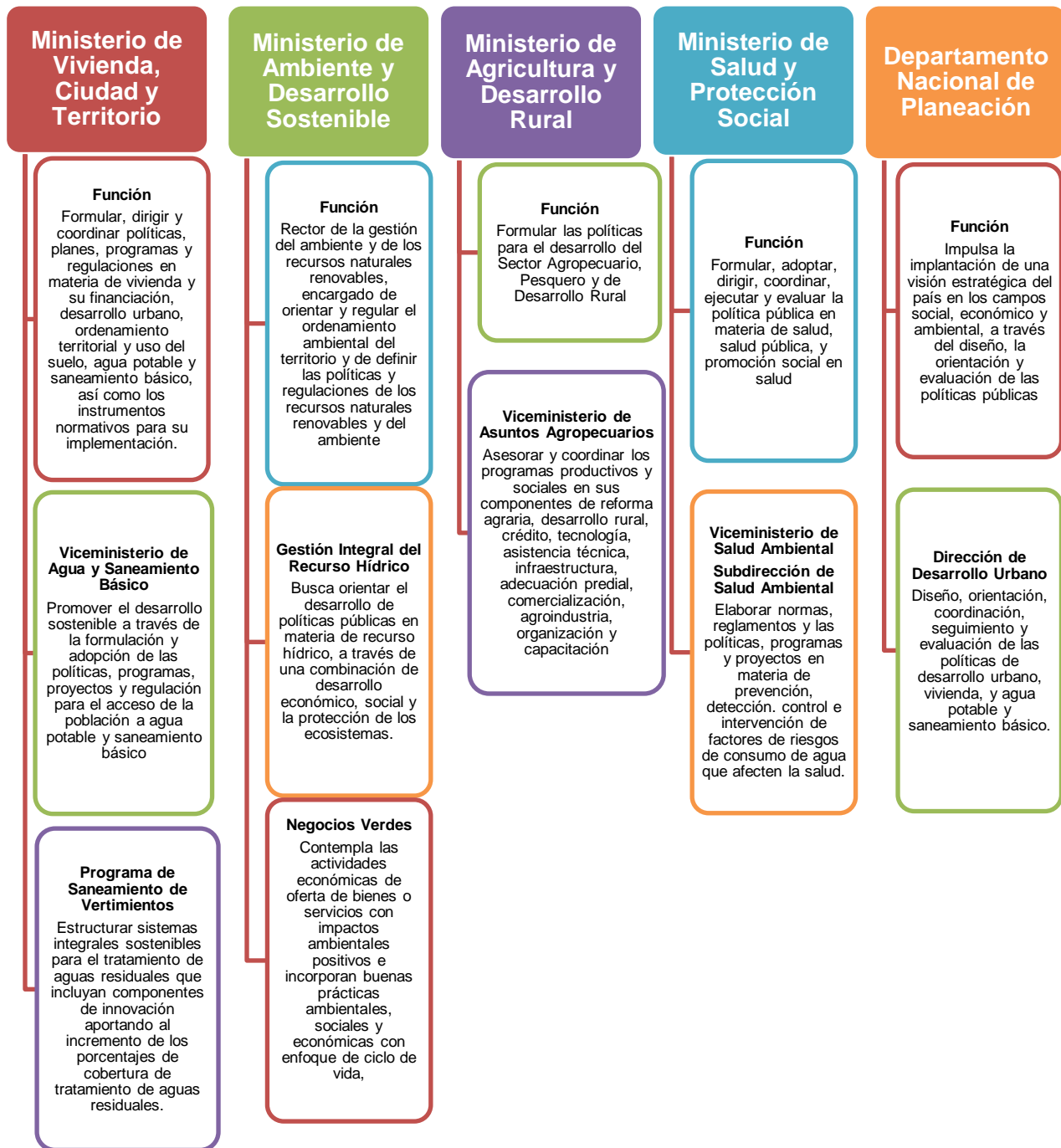
Como arreglo institucional, en el citado documento Conpes se definen las acciones de política que se requieren adelantar para la implementación de las estrategias de crecimiento verde. Dentro de los planes de acción propuestos, se encuentra el “Mejorar la coordinación interinstitucional, la gestión de la información y el financiamiento para la implementación de la Política de Crecimiento Verde a largo plazo¹²⁵”. Allí se proponen dos líneas de acción (Líneas de acción 36 y 37) dirigidas a fortalecer la coordinación institucional y a fortalecer las capacidades nacionales y regionales, respectivamente. Por tanto, se puede concluir que el mismo gobierno acepta que se requiere generar sinergias entre las entidades del sector.

En la actualidad en Colombia son más de 1028 las instituciones de orden nacional, regional y local, que tienen algún grado de intervención en la administración y la gestión del agua. (DNP, 2020). Ahora bien, en lo que respecta al tema de reúso del agua residual tratada, se encuentran competencias de tipo transversal en diferentes entidades del sector, como se puede apreciar en el Gráfico 112.

¹²⁴ Numeral 4.5 “Ausencia de un marco institucional, una débil gestión de la información e insuficiente financiación para la implementación de estrategias de crecimiento verde” del Documento Conpes 3934 de 2018, Pág.60.

¹²⁵ Numeral 5.3.5. del Documento Conpes 3934 de 2018, pág. 92.

Gráfico 112. Entidades del Gobierno Nacional involucradas con políticas de agua, saneamiento y temas ambientales



Fuente: Consorcio N&V - Caltiz Aguas residuales con base en información de Minvivienda, Minambiente, Minagricultura, Minsalud y DNP.

En el gráfico anterior, se presentan las principales entidades cabeza del sector de agua, saneamiento básico, sector agrícola y ambiente, del Gobierno Nacional. Cada una de ellas, según sus competencias, desarrolla planes y políticas propias

de su sector. Sin embargo, las actuaciones de estas, cuando tienen relación con temas de aguas residuales, reúso de agua tratada para uso doméstico, agropecuario e industrial, repercuten dentro de las competencias de las otras entidades.

Mediante el Decreto 585 de 2017 "*Por el cual se adiciona al Libro 2, Parte 2, Título 8, del Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, un Capítulo 3A relacionado con el Consejo Nacional del Agua.*", se creó el Consejo Nacional de Agua, en cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 250 de la Ley 1753 de 2015. Este Consejo está conformado por las entidades presentadas en el Gráfico 112 y participa también el Ministerio de Minas y Energía. Tiene por objeto la coordinación y articulación de las políticas, planes y programas de las entidades que la conforman en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

El Consejo Nacional del Agua tiene asignadas dos funciones que son clave para determinar su competencia en materia de reúso¹²⁶:

"1. Promover en coordinación con las entidades competentes, el desarrollo de planes, programas y proyectos dirigidos a la conservación y sostenibilidad del recurso hídrico, mejoramiento de la calidad del agua, el uso eficiente y ahorro del agua, la regulación hídrica, gestión del riesgo asociado al recurso hídrico y gobernanza del agua, entre otros, con el fin de elevar la calidad de vida de la población.

3. Promover la definición y articulación de recursos financieros por parte de las entidades que conforman el Consejo en el marco de sus competencias, para adelantar acciones prioritarias en materia de gestión integral del recurso hídrico." (énfasis nuestro).

El reglamento operativo del Consejo fue aprobado mediante el acuerdo No.1 del 13 de julio de 2018. El consejo sesiona en la sede del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se reúne ordinariamente de forma trimestral. Este delibera válidamente con la mitad más uno de miembros definidos en el artículo 2 del reglamento. A estas sesiones se podrán invitar a personas naturales o jurídicas quienes contarán con voz, pero sin voto.

¹²⁶ Decreto 1076 de 2015. Artículo 2.2.8.3A.1.3.

Es importante resaltar que el proyecto del documento Conpes de Economía Circular en lo referente a los servicios de agua potable y saneamiento, menciona¹²⁷: *“En la actualidad en Colombia son más de 10 (MVCT, MADS, MSPS, MME, ANLA, SSPD, CARs, Departamentos, Distritos, Municipios y Prestadores de servicios de acueducto y alcantarillado) las instituciones de orden nacional, regional y local, que tienen algún grado de intervención en la administración y la gestión del agua, lo cual dificulta la toma de decisiones sobre el recurso hídrico y a su vez en los servicios de agua potable y saneamiento; por lo cual se requiere mayor articulación en aspectos de gestión y protección del recurso, definición de proyectos para el tratamiento de aguas residuales, la provisión de agua y la protección ambiental.*

Si bien, a partir de la ley 1753 de 2015 se estableció el Consejo Nacional del Agua como un espacio de articulación sectorial en el cual se discuten aspectos principales en las agendas sectoriales ministeriales relacionados con el agua; no existe una entidad o dependencia con la atribución de la toma de decisiones en relación con el manejo del agua y que involucre la intersectorialidad en sus usos; instancia fundamental dada la gobernanza que se requiere desarrollar a fin de proteger el recurso hídrico y encaminar acciones que permitan balancear la oferta y demanda del recurso.”

En síntesis, se evidencia que no se cuenta con una entidad que se encargue de coordinar de manera integral el tema de recurso hídrico, específicamente en lo relacionado con el reúso de agua.

Como complemento a lo anterior, en el mismo proyecto del Conpes¹²⁸, se menciona que existen deficiencias en los instrumentos y procesos de planeación, los cuales no se articulan para el cumplimiento de los objetivos sectoriales. Esto genera diversas acciones, plazos, responsables y recursos trazados para diferentes objetivos, lo que no permite el cumplimiento de un plan de acción único sectorial. El documento menciona que existen al menos diez planes de acción formulados por diferentes entidades nacionales, los cuales no presentan una ruta de acción definida o no consideran aspectos más allá de sus límites político-administrativos. Esto da a lugar a que, en cada periodo de gobierno se formulen planes desarticulados con el ordenamiento territorial y que los planes previamente formulados, no contemplen necesidades del sector a nivel nacional, así como las metas o compromisos adquiridos por el país.

¹²⁷ Proyecto de CONPES de Economía Circular, numeral 3.1.1. “Debilidades en la institucionalidad en el sector-Institucionalidad Sectorial”. Pág.21.

¹²⁸ Proyecto de CONPES de Economía Circular, numeral 3.1.4. “Deficiencias en la planeación”. Pág.33.

Otro aspecto para destacar consiste en el monitoreo del cumplimiento de las disposiciones vigentes en materia de descontaminación. Dado que lo que no se mide no se puede controlar, se observa que los sistemas de información existentes en el país no cuentan con reportes suficientes y actualizados respecto a información de tratamiento de aguas residuales. Si bien, el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) es una herramienta madura y de conocimiento por parte de las instituciones del sector, y ha permitido crear una cultura de reporte por parte de los prestadores de los servicios, presenta deficiencias en cuanto a calidad de los datos. El proyecto del documento Conpes de Economía Circular en los servicios de agua potable y saneamiento, menciona sobre el particular que¹²⁹ *“Adicionalmente, podemos destacar que no se cuenta con información suficiente y óptima respecto de la remoción de carga orgánica que se logra en el país con los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes. Algunos datos preliminares obtenidos a través del SUI dan cuenta de que un promedio de 190 empresas que reportaron eficiencia de remoción de carga orgánica en términos de SST y DBO en los últimos tres años de 20% en 2016, 22% en el 2017 y 34% en 2018 (Superintendencia de Servicios Públicos, 2019), evidenciando que buena parte de los sistemas no alcanzan los niveles de remoción para tratamientos primarios y por lo tanto no logran evitar de manera significativa el vertimiento de carga orgánica a los cuerpos hídricos.*

Así mismo, se requiere mayor control e información para la toma de decisiones respecto de la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, pues de acuerdo con la información obtenida a través del SUI, sólo 27% de las empresas realizan el reporte de información al SUI en relación con la eficiencia de tratamiento de agua residual en su operación, lo que dificulta obtener información real sobre la eficiencia en remoción de carga orgánica de los sistemas de tratamiento de agua residual existentes en el país. (SSPD, 2018)”

Por lo tanto, se debe enfatizar y ser más exigentes en los mecanismos de control, inspección y vigilancia desde todos los aspectos de tratamiento de aguas residuales, con el fin de efectuar un monitoreo actualizado y real del tratamiento de agua residual en Colombia.

De otro lado, en relación con el aspecto económico, como se observó de las experiencias internacionales, existe discusión sobre el tema tarifario del agua residual tratada para su reúso.

En lo que respecta al caso colombiano, dentro del diagnóstico planteado en el Documento Conpes 3810 de 2014 *“Política para el Suministro de Agua Potable y*

¹²⁹ Proyecto de CONPES de Economía Circular, numeral 3.2.3. “Bajo porcentaje de tratamiento y control de vertimientos”. Pág.42.

Saneamiento básico en la Zona Rural", se menciona: "Los operadores de servicios en el área rural, en su mayoría, no cuentan con concesiones de agua o permisos de vertimiento. De acuerdo con los resultados obtenidos en el ISR, tan sólo un 33% de los prestadores de servicios de acueducto contaban con concesión de agua otorgada por las autoridades ambientales competentes, y en algunos casos no existen permisos ambientales para los vertimientos de las aguas servidas en sistemas colectivos o autorizaciones en el caso de soluciones individuales¹³⁰."

En relación con la infraestructura empleada para riego, la consultoría sobre productividad del uso del agua¹³¹ de la Misión de Crecimiento Verde, menciona que: "En Colombia existen actualmente cerca de 731 distritos de riego financiados con recursos públicos, cuya área corresponde solo al 7% del potencial de adecuación de tierras del país (UPRA, 2014)."

Sobre la eficiencia de los sistemas de riego en Colombia, el Conpes 3934 de 2018 que trata sobre la *Política de Crecimiento Verde*, en el diagnóstico¹³² se menciona que: "Desde la perspectiva del sector agropecuario, se observa que la demanda de este sector corresponde aproximadamente al 55% del agua usada en Colombia (Ideam, 2015), aunque produce cerca de un 7% del PIB (2015). En relación con los distritos de riego, se estimó que estos extraen cerca de 463 millones de metros cúbicos de fuentes superficiales, de los cuales el 50% es utilizado en el riego de cultivos, mientras que el 50% restante se consideran pérdidas. Así las cosas, la eficiencia del uso en el suministro de riego por parte de los distritos es del orden del 50% (DANE, Ideam, 2015)."

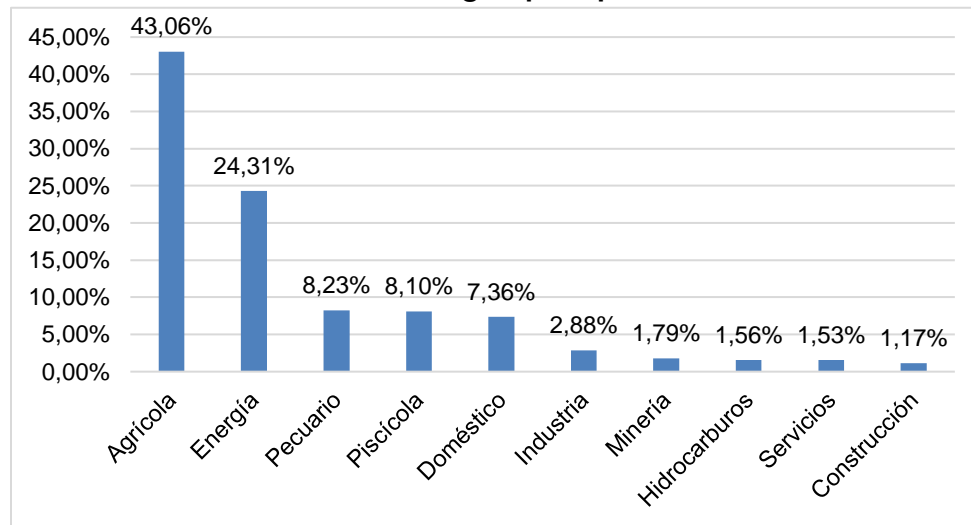
Al actualizar la cifra de la demanda del sector agropecuario, para el año 2018, ésta asciende al 59,40% (suma del sector de agrícola, pecuario y piscícola) respecto al total de la demanda de agua en Colombia. Por lo tanto, si se asume el mismo porcentaje de pérdidas de agua en los distritos de riego (50%), se deduce que, en volumen, se han incrementado los niveles de pérdidas en el sector agropecuario (Ver Gráfico 113).

¹³⁰ Conpes 3810 de 2014. Pág.24.

¹³¹ Consultoría sobre productividad del uso del agua y la eficiencia en el tratamiento de aguas residuales y en el reúso del agua en Colombia. Resumen ejecutivo del diagnóstico. Septiembre de 2017.

¹³² Numeral 4.2.2. "Ineficiente uso del recurso hídrico y bajo nivel en el reúso de aguas grises residuales y lluvias" del Documento Conpes 3934 de 2018, Pág.47.

Gráfico 113. Demanda de agua por tipo de uso en Colombia



Fuente: Estudio Nacional del Agua. IDEAM. 2018

Así las cosas, con base en lo mencionado en los párrafos anteriores, se observa que, en general, en las zonas rurales, donde se encuentra el sector agrícola, en muchos casos no cuentan con concesiones de agua, no se han realizado inversiones en infraestructura para riego, ni se cubren sus costos de operación y mantenimiento. Así mismo, no pagan tasas ambientales o tarifas por el uso del agua empleada para el riego de los cultivos en estas zonas.

Ante esta situación, el agricultor no cuenta con incentivos para emplear el agua residual tratada para reusarla en el riego de los cultivos. En la medida que éste capte el agua sin concesiones o permisos ambientales, así sea agua sin tratar, no le significa costo alguno. De igual forma, al no realizar inversiones, ni incurrir en costos de operación y mantenimiento de la infraestructura de redes empleadas para el transporte del agua a los cultivos, no le será atractivo el reúso del agua.

Es claro que para contar con agua residual tratada se incurre en altos costos, por lo que su empleo para reúso tendría que cumplir con un principio de onerosidad mediante el pago de una tarifa. Por un lado, se encuentran los costos de inversión de los Sistemas de Tratamiento de Agua Residual (STAR). Debido a la condición propia de cada región (población, piso térmico, etc.), son diferentes los tipos de tecnologías requeridas para cumplir de forma eficiente con los objetivos de remoción de las cargas contaminantes, los cuales tienen costos diferentes; así mismo, para la operación de los STAR, se incurren en costos tales como el de energía, químicos y de personal, entre otros. Por otro lado, las redes de distribución de las aguas residuales tratadas hacia su punto de entrega y sus labores de mantenimiento también generan otros costos de inversión y de operación.

Por lo tanto, aunque parte de estos costos pueden ser financiados por terceros total o parcialmente, como mínimo, se requiere contar con la fuente permanente de recursos que permita realizar la operación y mantenimiento de dichos sistemas, así como su sostenibilidad a largo plazo.

Respecto a los niveles de tratamiento de agua residual, es de recordar que uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), concretamente el número 6 (ODS 6), se refiere al Agua Potable y Saneamiento. Dentro de las metas para cumplir con este objetivo, el tercero de los subobjetivos del ODS 6 (6.3¹³³) establece:

“6.3 De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial”

En el Documento Conpes 3918 de 2018, que trata sobre la Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia, en su Anexo D, se definieron los indicadores y las metas por ODS a nivel nacional para cumplir a 2030. A continuación, la Tabla 59 presenta las metas del ODS 6.3.

Tabla 59. Meta del ODS 6.3. sobre tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia

| Meta ODS | Nombre Meta ODS | Nombre del Indicador | Línea Base 2015 | Meta Intermedia a 2018 | Meta Proyectada a 2030 |
|----------|--|---|-----------------|------------------------|------------------------|
| 6.3. | De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial | Porcentaje de aguas residuales urbanas domésticas tratadas de manera segura | 37,3% | 41,0% | 68,6% |

Fuente: Documento Conpes 3918 de 2018.

El Informe Sectorial de los Servicios públicos Domiciliarios de Acueducto de 2018 de la SSPD, menciona que *“Ahora bien, el caudal total tratado de aguas*

¹³³ Resolución 70/1. *“Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”*, la cual fue aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015.

residuales por los prestadores del servicio público de alcantarillado a cargo de los STAR urbanos y rurales del país, para el año 2018 correspondió a 28,95 metros cúbicos por segundo (m^3/s). En términos del indicador de tratamiento de aguas residuales propuesto por el Viceministerio de Agua potable y Saneamiento Básico y el Departamento Nacional de Planeación, este caudal depurado corresponde al 42,8% respecto al total del caudal estimado vertido en el país por los sistemas de alcantarillado.¹³⁴

Aun cuando a 2018, el cumplimiento del indicador del ODS 6.3. (42,8%) se encuentra por encima de la meta parcial a 2018 (41%), los niveles de tratamiento de aguas residuales continúan siendo bajos si se quiere contar con la oferta suficiente de agua residual tratada para efectos de reúso.

El objetivo de lograr que se emplee el agua residual tratada para su reúso enfrenta algunas barreras que deben ser superadas, entre ellas:

- Desarrollo de normas que permitan realizar y fomentar la actividad de reúso en diversos sectores de la economía.
- Reglamentación de las características fisicoquímicas del agua residual tratada para las actividades en que se pueda usar y, adicionalmente, mantener una coherencia entre el uso y la calidad del agua que se requiere para ese uso en específico y, de esta manera, no generar ineficiencias que puedan desincentivar el reúso del agua (p.ej. tecnologías onerosas para el uso que se pretende).
- Implementación de tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales, que sean adecuadas según las condiciones de cada región (temperatura, área de terreno, caudal a tratar, Capex y Opex).
- Asegurar la asistencia técnica para el correcto manejo y operación de estas plantas.
- Brindar asistencia técnica también a los agricultores para optimizar los mecanismos de riego diferentes al de gravedad (aspersión, goteo, etc.). Dentro de esta asistencia, es necesario concientizar tanto a los agricultores como a la comunidad en general, sobre los beneficios del uso del agua residual tratada desde diferentes puntos de vista, tales como el ambiental y económico, entre otros y demostrarles que, con los controles adecuados, el reúso del agua se puede considerar como una alternativa viable.

¹³⁴ Informe Sectorial de los Servicios públicos Domiciliarios de Acueducto 2018. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. Diciembre 2019. Pág. 96.

5.1.2. Aspectos sociales

En cuanto a los aspectos sociales para la implementación del reúso de agua residual en Colombia, no se tiene información de ningún proceso de inclusión de la comunidad en los diferentes proyectos que se han desarrollado en el país. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que para garantizar la implementación del reúso se requiere contar con la participación de todos los actores involucrados dentro del proceso, los cuales deben comprender los beneficios, costos y riesgos de su uso.

Actualmente, las aguas residuales son un insumo para las comunidades que hacen uso de ellas en actividades agrícolas. En la agricultura, el agua residual representa una alternativa viable que no solo contribuye a asegurar los cultivos en algunas zonas que, ante la variabilidad climática sufren de escasez, sino que les permite generar un mayor rendimiento en los cultivos por el contenido de nutrientes que contienen las aguas residuales.

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, existe el riesgo de que las aguas residuales sea un medio de transmisión de enfermedades, lo cual influye en la aceptación pública. Cuando las aguas residuales se utilizan en la agricultura, los patógenos son el principal peligro para la salud humana por su exposición a través de diferentes vías. Estas vías de exposición son principalmente el contacto con aguas residuales (agricultores, trabajadores de campo, y comunidades aledañas) y el consumo de productos cultivados con aguas residuales (consumidores).

Si bien actualmente en Colombia se utilizan las aguas residuales crudas o parcialmente tratadas para el riego de cultivos que están contaminados por distintas actividades, procesos industriales, mineros, y residuos de aguas domésticas, hacerlo explícitamente posible puede generar una fuerte oposición y rechazo de la ciudadanía.

Aproximadamente el 73% de la superficie de cultivos es irrigada con agua residual no tratada, en especial cultivos de consumo directo, como son las hortalizas (DNP, Borrador CONPES - Economía Circular en los servicios de Agua potable y Saneamiento, 2020). Esto puede representar un riesgo para la salud pública debido a los microorganismos patógenos como bacterias, virus u hongos presentes en el agua, que están directamente relacionados con enfermedades que pueden afectar la salud de la población. Adicionalmente, pueden generar impactos en el ambiente, especialmente en los ecosistemas asociados a las áreas de cultivo, incluyendo efectos sobre la biota (plantas, animales y demás organismos vivos) y el suelo. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016)

Según el Ministerio de Ambiente el agua residual tratada utilizada para riego puede tener altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes, metales, farmacéuticos y disruptores endocrinos y patógenos representando un riesgo para los consumidores y para la población que desempeña las actividades agrícolas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016)

5.1.3. Aspectos técnicos y ambientales

Colombia, cuenta con un porcentaje de tratamiento de aguas residuales de 42,8 % al año 2018¹³⁵, presentando un avance importante en los últimos años. Para el año 2018 según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en el país se identificaron 699 STAR¹³⁶, donde la región con mayor cantidad de sistemas de tratamiento de aguas residuales es la Andina, seguido de la región Caribe. Estas dos regiones representan el 84% de la concentración de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales en el país.

Se ha encontrado que en el país se cuenta con experiencia de la existencia de sistemas de tratamiento de agua residual que permiten hacer el reúso directo del agua tratada en sus instalaciones y para terceros, o que mediante obras de tratamiento adicionales pueden generar aguas tratadas con la calidad requerida para su reúso principalmente en el agro.

De manera general, las tecnologías existentes en nuestro país son potencialmente utilizables para entregar aguas residuales tratadas con la calidad requerida para el reúso agrícola, cumpliendo con los estándares definidos por la WHO y la FAO y la misma Resolución 631 de 2015 del MADS. Sin embargo, en algunos casos se requeriría la incorporación de unidades adicionales que permitan cumplir con los niveles de patógenos y de contenido de sólidos suspendidos y materia orgánica.

Es importante mencionar que en la normatividad colombiana no se permite el reúso doméstico ni la reinyección en acuíferos, se ha mostrado que el potencial de aplicación del reúso está dirigida principalmente al sector agrícola e industrial.

Las inversiones en construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales para reúso agrícola no tienen grandes desviaciones a las requeridas para dar cumplimiento a lo establecido en la Resolución 631 de 2015 sobre vertimientos a cuerpos de agua, siempre y cuando se haga revisión de algunos alcances en la norma vigente de reúso, que le permitan diferenciar su destinación para cultivos

¹³⁵ Este porcentaje se obtienen con base en el volumen de agua vertida por los usuarios del servicio de acueducto, así como de 190 sistemas de tratamiento de aguas residuales reportadas por la SSPD, que tratan las aguas residuales producidas por 230 municipios.

¹³⁶ Sistemas de Tratamiento de aguas residuales

que se consumen o no directamente o requieren un proceso comercial para su utilización. En este sentido no se requerirá, por ejemplo, incorporar en general, unidades de tratamiento para la remoción de nutrientes, pues estos se constituyen en un recurso adicional proveniente de las aguas residuales, en especial las de origen doméstico.

Para el reúso industrial, las tecnologías de tratamiento de aguas residuales son en general más exigentes a las requeridas para hacer el reúso con destinación agrícola. Esto debido a que los criterios de calidad que se tienen al interior de las empresas son en general más restrictivos frente a los establecidos en la normatividad ambiental vigente para reúso industrial, para algunos parámetros. En todo caso, de acuerdo con lo encontrado en las experiencias realizadas, las cuales serán presentadas más adelante, puede ser necesario realizar modificaciones a la norma vigente para el reúso industrial, en cuanto a procesos industriales en los que puede ser usada el agua del reúso, así como de los parámetros que se deben regular y a los mecanismos que se deben incorporar para que sea atractiva la implementación del reúso.

Según el estudio desarrollado por la Misión de crecimiento Verde 2017 para el sector agrícola, falta información sobre la gestión del recurso hídrico, como el tipo de sistema de riego, tipo de captación, capacidad de derivación, volumen de agua captada, pérdidas y flujos de retorno. Así mismo, en el estudio se señala que en el país no ha existido articulación entre las actividades en la adecuación de tierras, el desarrollo productivo del sector, la necesidad de los mercados y la gestión integral del recurso hídrico y de cuencas.

En dicho informe se menciona que hay otros aspectos críticos en los distritos de adecuación de tierras que influyen en la eficiencia y productividad del agua. Estos aspectos están relacionados con: (i) el mal estado de la infraestructura de los canales de conducción y distribución del agua, debido a la falta de mantenimiento y baja operatividad de los mismos; (ii) que solo hasta el año 2017 se publicó una guía con criterios y rigurosidad técnica para la priorización de proyectos en el subsector; (iii) la falta de capacidad de los operadores de los distritos para considerar aspectos financieros, de participación pública y privada, y de administración y manejo adecuados. En muchos casos los distritos de riego son operados por asociaciones de usuarios, que no siempre tienen objetivos claros, estructuras organizacionales definidas ni las capacidades y conocimientos necesarios para su administración.

Sobre el sector pecuario, el estudio de la Misión de crecimiento verde referenciado señala que no fue posible contar con un cálculo de eficiencia en el uso del agua, pero sí se determinó que este sector es considerado como uno de los

principales causantes de problemas ambientales como el cambio climático, la degradación del suelo, la escasez y contaminación del agua, y a su vez es uno de los más afectados por esos mismos factores.

5.1.4. Aspectos legales

El reúso de agua en Colombia es un concepto que ha tomado forma en los últimos años, sin embargo, el término y algunos de sus elementos fueron mencionados en la normatividad y documentos de política en el pasado los cuales siguen siendo importantes para comprender el régimen del reúso. De acuerdo con esto, se pueden distinguir dos etapas del régimen: (i) previo a la regulación del reúso y (ii) posterior a la regulación del reúso mediante la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La primera etapa comprende desde la expedición del Código Nacional de Recursos Naturales, donde se incluyen las primeras menciones normativas a deberes del Estado respecto del recurso agua y la posibilidad de permitir la utilización de aguas negras en el país. En esta medida, El Código Nacional de Recursos Naturales (Decreto Ley 2811 de 1974) indicó en el artículo 134 que *“Corresponde al Estado garantizar la calidad del agua para consumo humano y, en general, para las demás actividades en que su uso es necesario. Para dichos fines deberá: (...) g) Determinar los casos en los cuales será permitida la utilización de aguas negras y prohibir las condiciones para el uso de estas. (...)”*.

A pesar de lo anterior, no se produjo regulación específica sobre este asunto y el siguiente hito corresponde a la expedición de la Ley 99 de 1993, la cual establece en su artículo 65 que es una función de los municipios y distritos: *“ejecutar obras o proyectos de descontaminación de corrientes o depósitos de agua afectados por vertimientos del municipio, así como programas de disposición, eliminación y reciclaje de residuos líquidos y sólidos y control a las emisiones contaminantes del aire”*. (énfasis nuestro).

La Ley 373 de 1997, aún vigente, corresponde a la norma que estableció el programa de uso eficiente y ahorro del agua. El reúso hace parte esencial de programas de eficiencia y ahorro del recurso, por lo que la norma incluye en el artículo 5 el reúso obligatorio del agua, en los siguientes términos:

“Las aguas utilizadas, sean éstas de origen superficial, subterráneo o lluvias, en cualquier actividad que genere afluentes líquidos, deberán ser reutilizadas en actividades primarias y secundarias cuando el proceso técnico y económico así lo ameriten y aconsejen según el análisis socioeconómico y las normas de calidad ambiental. El Ministerio del Medio Ambiente y el Ministerio

de Desarrollo Económico reglamentarán en un plazo máximo de (6) seis meses, contados a partir de la vigencia de la presente ley, los casos y los tipos de proyectos en los que se deberá reutilizar el agua."

Para el año 2002 se expidió el CONPES 3177 correspondiente a las "Acciones prioritarias y lineamientos para la formulación del Plan Nacional de manejo de aguas residuales". En este documento se estableció el reúso como un criterio de priorización de municipios para el plan nacional de manejo de aguas residuales – PMAR y en la sección de revisión, actualización y desarrollo normativo se encargó al Ministerio de Medio Ambiente, MDE y al Ministerio de Salud "proponer un proyecto reglamentario de la Ley 99 de 1993 sobre el reúso de aguas residuales para los casos en los cuales el usuario considere este tipo de alternativa de manejo".

Por otra parte, posterior a la Ley 373, el Decreto 3930 de 2010 incorpora una definición de reúso del agua como "utilización de los efluentes líquidos previo cumplimiento del criterio de calidad"¹³⁷. Este decreto hace uso del concepto para efectos del Plan de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos, indicando que uno de los objetivos de este es la reutilización de subproductos o materias primas y que como contenido mínimo del plan debe incluirse una "descripción técnica de los procesos de optimización, recirculación y reúso del agua, así como de las cantidades de los subproductos o materias primas reciclados o reutilizados, por unidad de producción"¹³⁸.

Hasta este punto, si bien se menciona el reúso, no existe una regulación específica que sirva para hacerlo operativo. Por lo tanto, el mayor inconveniente para la implementación del reúso ha sido la falta de normas específicas de las autoridades competentes a pesar de que cuentan con las potestades suficientes desde la definición del Sistema Nacional Ambiental – SINA en la Ley 99 de 1993, el mandato legal de la Ley 373 de 1997 y la política contenida en el CONPES 3177 de 2002.

El hito clave en el reúso corresponde a la expedición de la Resolución 1207 de 2014 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde, como lo dice su objeto, se establecen las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada, para hacerlo operativo en Colombia.

¹³⁷ Decreto 3930 de 2010. Artículo 3, numeral 28.

¹³⁸ Decreto 3930 de 2010. Artículo 63.

Esta resolución regula las condiciones en que opera el reúso, qué clase de permisos se requieren y sus condicionamientos especiales (balances de materia o masa), los usos establecidos para agua residual tratada divididos en agrícola e industrial y los criterios de calidad exigidos, por lo que en principio debería ser suficiente para garantizar la aplicabilidad del reúso.

Sin embargo, el decreto adolece de ciertas condiciones que llevan a nuevas problemáticas o que no resuelven algunas cuestiones que se esperaba fueran definidas, las cuales afectan la aplicación del reúso en el contexto actual. Nuevamente el problema para la implementación se debe a la insuficiencia normativa para regular adecuadamente la actividad y la falta de incentivos.

Sobre este último punto, la CRA reconoció que pese a la potencialidad que tiene el reúso, su aplicación ha sido poco implementada en el país, dado que la Resolución en sí, no contiene incentivos suficientes para que las industrias o los individuos en general reúsen sus aguas residuales tratadas. (CRA, 2019). Adicionalmente, llama la atención sobre: (i) el poco número de concesiones otorgadas y que el CONPES 3934 de 2018 ya había expuesto la necesidad de revisar y ajustar la Resolución 1207 de 2014, (ii) la restricción de actividades sobre las cuales se puede utilizar agua reusada, lo cual limita la posibilidad de expansión de esta actividad.

Producto del estado de emergencia declarado por la pandemia de COVID-19, la CRA autorizó mediante la Resolución 911 de 2020 el reúso de agua para el lavado y desinfección de áreas públicas durante la emergencia sanitaria *“siempre y cuando las condiciones de esta sean aptas para el lavado de áreas públicas y los procesos de desinfección requeridos”*. Esto evidencia la potencialidad del reúso para evitar el desperdicio o uso innecesario del recurso hídrico en situaciones en las que hay que priorizar la conservación del agua potable y su empleo en consumo humano.

A continuación, se presentan las barreras identificadas para la implementación del reúso de aguas residuales desde el punto de vista legal:

5.1.4.1. Redacción que lleva a interpretaciones restrictivas

De acuerdo con el artículo 3 de la Resolución 1207 de 2014, se habla de dos supuestos: (i) que el usuario generador y el usuario receptor sean la misma persona o (ii) que se trate de personas diferentes. Para ambos supuestos se exige la *“modificación de la concesión de aguas, de la licencia ambiental o del plan de manejo ambiental”* para poder hacer uso de aguas residuales tratadas.

Esta redacción excluye por completo a los usuarios que no requieren de concesión de aguas, licencia ambiental o plan de manejo ambiental, por ejemplo, personas naturales o jurídicas conectadas a una red de acueducto propiedad de un prestador del servicio público. De igual manera, en el país existen usuarios que reciben agua potable a través de entrega por carrotanques para ser utilizadas en las actividades productivas al interior de la industria y no contar con permiso de concesión de aguas no debería ser un limitante para el reúso dentro de sus actividades o procesos productivos.

No se observa una razón jurídica que fundamente limitar el acceso de usuarios conectados a la red, por el contrario, hacerlo va en contra de los objetivos y alcance de los Planes de uso eficiente y ahorro de Agua – PUEAA en el marco de la Ley 373 de 1997 y de la economía circular y la política de crecimiento verde (CONPES 3934 de 2018).

5.1.4.2. Lista limitada de actividades en que se autoriza el reúso

El artículo 6 de la Resolución 1207 de 2014 indica los usos que se le pueden dar al agua tratada. Al estar redactado como lista taxativa, excluye cualquier otra actividad para la que podría ser clave el reúso.

Si bien se entiende la preocupación de las autoridades de ampliar el reúso y que la lista se incluyó para evitar que se generen efectos negativos al medio ambiente o a la salud, la resolución no debe ser estática, es decir, debe estar en un proceso constante de estudio y actualización para incrementar paulatinamente su alcance y las actividades cubiertas.

En el proyecto de CONPES de Economía Circular en los servicios de agua potable y saneamiento se llama la atención sobre el alcance restrictivo del listado así: *“Adicionalmente, del análisis realizado por el DNP a la resolución vigente, se encontró que se establecen pocas actividades en las cuales se permite el reúso de agua residual tratada, limitándose al vaciado de baños, limpieza e irrigación de vías y sistemas de control de incendios y para actividades agrícolas de algunos tipos de cultivo y áreas verdes en parques y campos deportivos y jardines en áreas no domiciliarias”* (CONPES, 2020).

Como ejemplo de lo anterior, no estaría permitido el riego de jardines no domiciliarios en suelo de usos no residenciales y en jardines y parques que hacen parte de la infraestructura y dotación de los municipios, lo que obliga a continuar el riego de estos espacios con agua potable a pesar no ser necesario. También

quedaron por fuera actividades como lavado de vehículos, lavado de fachadas y espacio público, apagado de coque, humectación de arcillas, entre otros, donde no es claro cuál es el posible perjuicio que motivó no incluirlos.

5.1.4.3. Interpretaciones disímiles entre autoridades ambientales

Como consecuencia directa de los vacíos y la falta de claridad en la regulación, las distintas autoridades ambientales pueden desarrollar interpretaciones diferentes de la aplicación de la norma, como de hecho ha venido sucediendo. Para evitar estas dificultades, se necesita de coordinación y de lineamientos desde el MADS para unificar la aplicación de la norma y garantizar que se cumplan los propósitos que esta persigue.

5.1.4.4. Gratuidad en el reúso de agua

El párrafo 1° del artículo 3 de la Resolución 1207 de 2014 señala que: *“En ningún caso el Usuario Generador puede cobrar por las cantidades (volúmenes) de Agua Residual Tratada entregadas al Usuario Receptor.”*

Este factor es un desincentivo muy grande considerando el incremento de costos para el nivel de tratamiento exigido por la norma y la infraestructura necesaria para el transporte del agua tratada hasta el usuario receptor.

Las dinámicas de mercado y que el reúso sea optativo implica que el usuario generador no estará dispuesto a tratar y entregar agua residual tratada si le supone mayores costos que disponer de esta mediante el vertimiento. En la mayoría de los casos esto será así, pues se requiere de sistemas especializados e infraestructura para el transporte que el generador no puede cubrir con alguna clase de ingreso o tarifa.

Desde la perspectiva del sujeto que comparte la calidad de originador y receptor, como otra consecuencia derivada de los desincentivos económicos, se confina el reúso a lugares donde la disponibilidad hídrica es tan crítica que los costos de captación y tratamiento justifican construir la infraestructura requerida para el reúso.

5.1.4.5. Cobro de doble tasa por uso

Para el supuesto en que usuario generador y usuario receptor sean sujetos distintos, cada uno debe contar con concesión de aguas, licencia ambiental o plan de manejo ambiental. En consecuencia y según lo determina la norma, cada

concesión (o en general actividad que implique la utilización de aguas) da lugar al pago de tasa por el uso de agua.

De acuerdo con esto, no solo se carece de incentivos económicos, sino que tanto generador como receptor están pagando por el agua captada de la fuente natural, es decir, hay un doble cobro de tasa por uso de agua.

El párrafo 3° de la Ley 99 de 1993 expone: *“La tasa por utilización de aguas se cobrará a todos los usuarios del recurso hídrico, excluyendo a los que utilizan el agua por ministerio de ley, pero incluyendo aquellos que no cuentan con la concesión de aguas, sin perjuicio de la imposición de las medidas preventivas y sancionatorias a que haya lugar y sin que implique bajo ninguna circunstancia su legalización”*. (énfasis nuestro).

En la práctica, esto significa que se están aplicando las mismas disposiciones del agua captada de una fuente natural, lo que no tiene mucho sentido si la intención de las autoridades es fomentar el reúso, ya que esta tasa sumada a otros costos puede ocasionar que siga siendo más económico comprar y utilizar agua potable.

5.1.4.6. Necesidad de una distinción normativa entre reúso y recirculación

La Resolución 1207 de 2014 no hace distinción entre los conceptos de reúso y recirculación, por lo que este último no está articulado con las normas de reúso. Esto abre la puerta a interpretaciones contradictorias de las autoridades ambientales sobre los eventos en que se configura uno u otro. En la Tabla 60 se describen las diferencias entre los dos términos.

Tabla 60. Distinción normativa entre reúso y recirculación

| Reúso | Recirculación |
|---|---|
| Requiere que el agua residual se utilice en un uso diferente al original. | Requiere las mismas condiciones originales por ende debe ser usada en la misma actividad donde se generó. |
| No se puede aplicar autorregulación. | Se puede aplicar autorregulación. |

| Reúso | Recirculación |
|--|--|
| Requiere trámites además de aplicar un tratamiento previo. (El tratamiento previo no sería indispensable siempre y cuando los criterios de calidad de agua de uso siguiente se cumplan y cuando se genere el vertimiento final este cumpla los criterios de la 1076/2015). | No se requiere ningún tipo de trámite. |
| No es posible abarcar todas las actividades del reúso, deberían determinarse los aspectos más relevantes. | No está claramente definida o especificada, se sugiere que se conceptualice adecuadamente. |
| Puede darse sin tratamiento siempre y cuando cumpla con los criterios al ser usada o al tener contacto con el medio natural. | Eventualmente se pueden generar vertimientos, se debe calcular correctamente con el fin de realizar los trámites correspondientes. |
| Ciclo no cerrado | Ciclo Cerrado |

Fuente: Universidad Tecnológica de Pereira. (2016). Informe Final Contrato 352-2016 entre Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Universidad Tecnológica de Pereira.

El reúso está definido en el artículo 2 de la Resolución MADS 1207 de 2014, mientras que la definición de recirculación parece reducirse al ámbito de la Guía para el uso eficiente y ahorro del agua emitida por el MADS en el año 2018, por lo que no hay mención normativa de recirculación que genere simetría en el tratamiento de ambos conceptos.

De acuerdo con lo anterior, para perseguir y alcanzar los objetivos del Gobierno Nacional en reúso (entendido como un propósito enfocado en el aumento de productividad por volumen de agua utilizado) es necesario aclarar la diferencia entre reúso y recirculación y propender por la ampliación y la difusión de la recirculación, o por lo menos diferenciarlos con suficiencia y claridad del reúso, garantizando igualmente condiciones de seguridad y salubridad.

5.1.4.7. Uso de agua no tratada

Aunque el enfoque de la Resolución es el reúso de agua tratada, surge la duda de cuál es el régimen aplicable al agua no tratada, es decir, el agua que no sufrió tratamiento ni es agua potable pero que sí cuenta con los parámetros para considerarse (o ser equivalente a) agua tratada habilitada para el reúso. En principio este recurso debería poder usarse en las actividades autorizadas para el reúso siempre y cuando cumpla con los estándares de calidad definidos por la norma.

Un ejemplo claro de este recurso son las aguas lluvia captadas y almacenadas. En caso de recurrir a estas para diversos usos habrá un desfase entre las cantidades autorizadas en la concesión y el recurso empleado, lo cual puede generar consecuencias negativas de tipo sancionatorio para el usuario por el aparente incumplimiento del permiso. En consecuencia, se echa de menos una disposición en la regulación que trate la materia y permita combinar estos usos en beneficio de la eficiencia en la utilización del recurso hídrico.

5.1.4.8. Riego y ferti-riego

La resolución expresamente excluye el empleo de agua residual tratada como fertilizante o acondicionador de suelos. En la realidad, estos usos son tradicionales y claves para el fomento del reúso, por lo que deben encontrarse los mecanismos que permitan aplicarlo. Por ejemplo, el establecimiento de parámetros de fertilización en función de las necesidades nutricionales de los cultivos y el suelo, y especificaciones de seguridad como el riesgo de contaminación de fuentes superficiales y subterráneas (UTP, 2016).

5.2. Casos exitosos de reúso en Colombia

5.2.1. Reúso Agrícola

5.2.1.1. Reúso de aguas de producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias

La experiencia de Ecopetrol que se ilustra para el presente caso está basada en varios documentos y comunicaciones sostenidas por la Empresa, en la cual se muestran los resultados de sus proyectos y aproximaciones a la actividad del reúso (Almansa-Manrique, Velásquez-Penagos, & Rodríguez-Yzquierdo, 2018) (Ecopetrol 2020).

El petróleo que se extrae de la tierra sale mezclado con aguas conocidas como aguas de producción, las cuales hacen parte de los fluidos naturales de los reservorios. En Colombia, por cada barril de petróleo se producen, en promedio, 13 barriles de agua. Las aguas de producción pueden ser tratadas y reinyectadas en la misma formación, para mantener la presión de los yacimientos y aumentar el factor de recobro; ser tratadas y vertidas a cuerpos de aguas superficiales o al suelo, o ser reinyectadas en los yacimientos, como estrategia de disposición final. Las aguas de producción de los yacimientos de la Orinoquia tienen un contenido relativamente bajo de sales y sólidos disueltos, y no poseen elementos radioactivos. Esta condición permite que, una vez que sean tratadas, puedan reusarse en actividades productivas en predios rurales que se encuentren en el área de

influencia de los proyectos petroleros (Almansa-Manrique, Velásquez-Penagos, & Rodríguez-Yzquierdo, 2018).

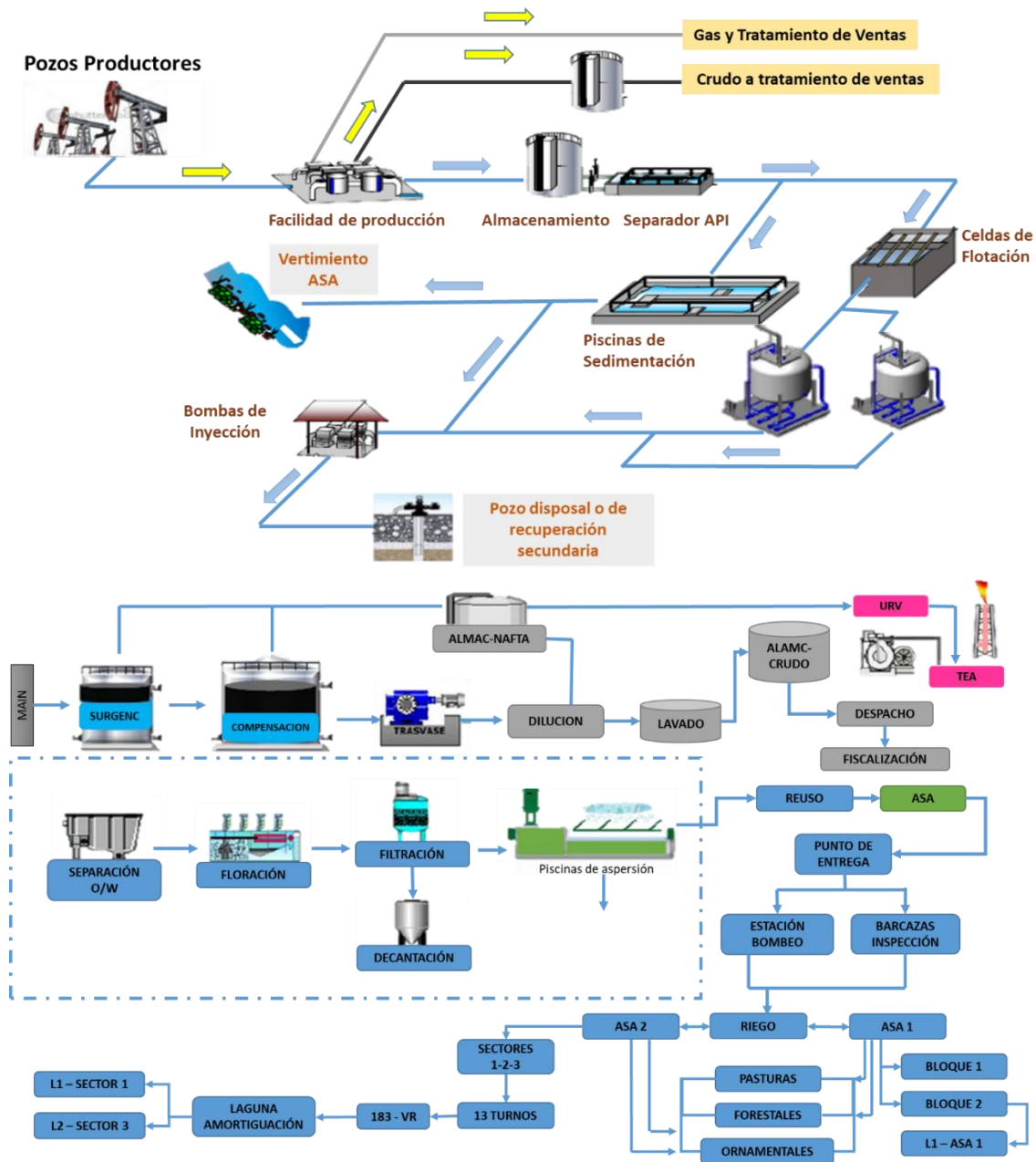
Por estas razones, la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) desarrolló una serie de trabajos de investigación, dirigidos a evaluar opciones de utilización de estas aguas de producción tratadas para la irrigación de cultivos y pastos, así como para el consumo de ganado y aves de corral. En el año 2011, Ecopetrol firmó con la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) un convenio de cooperación, con el fin de realizar dicha investigación, a través de la cual se determinó el efecto de la aplicación de aguas de producción tratadas en diferentes componentes del ecosistema y en sistemas de producción agrícola y pecuario.

El estudio se desarrolló en el departamento del Meta, en el predio denominado Área Sostenible Agroenergética (ASA) (03°53'06" N y 73°35'04" O) ubicado aproximadamente en el km 19 de la vía Acacías-San Carlos de Guaroa, Meta (Colombia) y en el Centro de Investigación La Libertad (04°03'32" N y 73°27'59" O), ubicados en los municipios de Acacías y Villavicencio, respectivamente. El agua de producción tratada que se utilizó provenía de los campos de Castilla y Apiay. Se seleccionó un conjunto de variables de suelos, agua, cultivos y animales, que fueron monitoreadas y analizadas entre los años 2011 y 2015 (Corpoica 2018).

Las aguas de producción son enviadas a sistemas de tratamiento como los referenciados en el Gráfico 114 y los resultados de la calidad de agua después de los procesos de tratamiento son los que se muestran en la Tabla 61 (última caracterización de 2019, que demuestra que las aguas tratadas tienen las condiciones que regulan el uso agrícola, como si fuese un agua residual tratada).

Gráfico 114. Esquemas tratamiento de aguas de producción para reúso – Ecopetrol

Sistema de Tratamiento y Alternativas de Disposición actuales Castilla



Fuente: Ecopetrol (2020)

Es importante señalar que para recirculación de aguas de producción tratadas derivadas de la extracción del petróleo, los criterios de calidad especificada en la Resolución 1207 de 2014 no aplican, porque no se caracteriza como reúso de aguas residuales tratadas. En la Tabla 61 se presentan los resultados y la comparación con algunos de los criterios de la citada resolución.

Tabla 61. Resultado características del agua de producción tratada - Salida Barcazas – ASA - Campo de Producción Castilla. Ecopetrol S.A. diciembre de 2019.

| No. de Laboratorio | 50963-1 | Resolución 1207 de 2014 |
|---|------------------------|-------------------------|
| Identificación | Salida de las Barcazas | |
| Fecha de Muestreo | 30/12/2019 | Uso Agrícola |
| Parámetro (unidades) | Resultado | |
| pH Unidades | 7,94 | 6-9 |
| Temperatura °C | 36,34 | -- |
| Conductividad | 470 | 1500 |
| Cloro Residual | 0,12 | <1,00 |
| Material Flotante | NO | -- |
| Boro mg B/L | <0,109 | 0,4 |
| Molibdeno mg Mo/L | <0,010 | 0,07 |
| Aluminio mg/L | <0,20 | 5 |
| Arsénico mg As/L | <0,005 ¹ | 0,1 |
| Aceites Y Grasas mg/L | 7,7 | -- |
| Berilio mg Be/L | <0,05 | 0,1 |
| Bicarbonatos mg CaCO ₃ /L | 63,84 | -- |
| Calcio Total mg Ca/L | 10,89 | -- |
| Cadmio mg/L | <0,003 | 0,01 |
| Cloruros mg Cl/L | 94,59 | 300 |
| Cianuro Libre mg CN/L | <0,05 | 0,2 |
| Carbonatos mg CaCO ₃ /L | <20,00 | -- |
| Cobalto mg Co/L | <0,03 | 0,05 |
| Cromo Total mg Cr/L | <0,01 | 0,1 |
| Carbonato De Sodio Residual meq/L | 0,36 | -- |
| Cobre mg Cu/L | <0,20 | 1 |
| Demanda Bioquímica De Oxígeno DBO ₅ mg O ₂ /L | 1,28 | -- |
| Hierro mg Fe/L | <0,30 | 5 |
| Fenoles mg Fenol/L | <0,10 | 1,5 |
| Fluoruros mg F/L | 0,47 | 1 |
| Hidrocarburos Totales mg/L | 0,98* | 1 |
| Mercurio mg/L | <0,001 ² | 0,002 |
| Potasio mg K/L | 5,8 | -- |
| Litio mg Li/L | 0,15 | 2,5 |
| Magnesio mg Mg/L | 1,78 | -- |
| Manganeso mg Mn/L | <0,10 | 0,2 |
| Sodio mg Na/L | 54,2 | 200 |
| Níquel mg/L | <0,02 | 0,2 |
| Nitrógeno Nitratos mg NO ₃ -N/L | <1,5 | 5 |
| Plomo mg/L | <0,05 | 5 |
| Porcentaje de Sodio Posible % | 94,00 | -- |

| No. de Laboratorio | 50963-1 | Resolución 1207 de 2014 |
|--------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Identificación | Salida de las Barcazas | |
| Fecha de Muestreo | 30/12/2019 | Uso Agrícola |
| Parámetro (unidades) | Resultado | |
| RAS N.A. | 4,02 | -- |
| Salinidad Efectiva meq/L | 2,51 | -- |
| Salinidad Potencial meq/L | 0,14 | -- |
| Selenio mg Se/L | <0,005 | 0,02 |
| Sulfatos mg SO ₄ /L | <10,00 | 500 |
| Vanadio mg/L | <0,10 | 0,1 |
| Zinc mg Zn/L | <0,05 | 3 |

1: Las unidades reportadas por el laboratorio para el As son $\mu\text{g/L}$, donde para comparación normativa se hace conversión de unidades $<5,0\mu\text{g/L} = <0,005\text{mg/L}$.

2: Las unidades reportadas por el laboratorio para el Hg son $\mu\text{g/L}$, donde para comparación normativa se hace conversión de unidades $<1,0\mu\text{g/L} = <0,001\text{mg/L}$

*: Se reporta el dato neto obtenido ya que el valor del límite de cuantificación.

Fuente: Ecopetrol (2020)

Los resultados de esta investigación indican que la utilización de estas aguas y su aplicación al suelo no presentaron efectos significativos en las propiedades físicas y químicas del suelo. Tampoco se evidenciaron consecuencias importantes en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, ni en la salud de animales y cultivos.

El suelo donde fue realizado el estudio pertenece a la subclase agrológica VI-s1, que se relaciona con actividades de ganadería semi intensiva, pastos de corte, producción de algunos frutales, así como sistemas de agroforestería y especies maderables (Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2004). Así mismo, la vegetación predominante estuvo representada por el pasto *Brachiaria* sp. En el ASA se realizaron estudios edáficos y pecuarios (ganado bovino y aves). Se realizaron dos riegos semanales con agua de producción tratada de la estación de Ecopetrol de Apiay,

Adicionalmente, en el Centro de Investigación (CI) La Libertad de Corpoica (km 19 vía Villavicencio-Puerto López), ubicado también en el departamento del Meta, se trabajó en espacios controlados con cultivos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) y pasto elefante (*Pennisetum purpureum*), y en sistemas de producción pecuarios (bovinos y peces). Los suelos son de clase IV y de topografía plana, con texturas medias (franco-arcillo-arenoso), contenidos de materia orgánica entre el 2 % y el 3 % y un pH que va de moderado a fuertemente ácido (IGAC, 2004). Se utilizaron dos riegos semanales con agua de pozo profundo del CI La Libertad.

La calidad del agua de producción tratada y la de pozo profundo se presentan en la Tabla 62.

Tabla 62. Calidad del agua de producción tratada y del agua de pozo profundo utilizadas en los experimentos

| Variable | Agua de producción de Apiay | Agua de pozo del CI La Libertad |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) | 1.220 | 38,5 |
| Cloruros (mg/L) | 215 | < 3,3 |
| Calcio (mg/L) | 9,35 | 1,21 |
| Magnesio (mg/L) | 2,67 | 0,38 |
| Sodio (mg/L) | 104 | 1,58 |
| Manganeso (mg/L) | 0,22 | < 0,079 |
| Bario (mg/L) | 1,04 | < 0,096 |
| Cadmio (mg/L) | < 0,01 | < 0,01 |
| Mercurio (mg/L) | < 0,002 | < 0,001 |
| Molibdeno (mg/L) | < 0,106 | < 0,01 |
| Arsénico (mg/L) | 0,0005 | 0,0004 |
| Relación de adsorción de sodio (ras) | 7,7 | 0,32 |
| Hidrocarburos totales (mg/L) | 0,74 | < 0,67 |
| Grasas y aceites (mg/L) | 4,77 | - |
| Sólidos suspendidos totales (mg/L) | 13,27 | - |

Fuente: Corpoica 2018

Los resultados fueron comparados con la normativa de reúso de aguas residuales tratadas (Resolución 1207 de 2014) y los artículos 40 y 41 del Decreto 1594 de 1984 sobre vertimientos, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que establece los criterios admisibles para la destinación del recurso agua en sistemas agrícolas y pecuarios. Se evidencia que las aguas de producción tratadas de Apiay cumplieron con todos los parámetros exigidos para uso agrícola y pecuario durante el periodo de evaluación.

Los resultados obtenidos durante cinco años de investigación en los campos experimentales del predio Área Sostenible Agroenergética (ASA) y el Centro de Investigación La Libertad de Corpoica indican que, en las condiciones de los llanos orientales, las aguas de producción tratadas de los campos de Apiay y Castilla, que cumplen con la norma legal establecida, al ser utilizadas para riego no tuvieron efectos negativos en las propiedades físicas del suelo: densidad aparente, porosidad y estabilidad de agregados.

En cuanto a las propiedades químicas, el uso de estas aguas aumentó los contenidos de Ca, Mg, K y Na, así como la capacidad de intercambio iónico (CIC) en el suelo. Adicionalmente, en los años de riego con estas aguas no se observó acumulación de metales pesados como cadmio, bario, cromo y plomo. De igual forma, durante todo el tiempo de evaluación, el contenido de hidrocarburos estuvo por debajo del rango detectable, y sin diferencias entre suelos regados con agua de pozo y con aguas de producción tratadas.

En lo que se refiere al desarrollo de cultivos, no se observó ningún efecto negativo por el uso de aguas de producción tratadas, y se registraron mejores índices de biomasa y crecimiento, en comparación con los datos regionales de cultivos como la caña de azúcar y pasto elefante.

En este trabajo también se analizó el uso de estas aguas en la dieta de bovinos y aves. Los resultados del estudio no mostraron asociaciones que permitan evidenciar efectos del consumo de estas en el desarrollo y la producción de carne, leche y huevos, ni cambios post mortem observados a nivel macroscópico y microscópico de los tejidos, que demostraran condiciones que afectan la salud de bovinos y aves.

Aplicación de la normativa vigente

Como ya se indicó anteriormente, Ecopetrol produce volúmenes importantes de agua con la explotación de sus activos ubicados en los municipios de Acacías y de Villavicencio. La destinación de esta agua en el pasado era recibir tratamiento para ser vertida a cuerpos de agua superficial en cumplimiento de las normas y parámetros vigentes. La intención de Ecopetrol, de la mano de Corpoica, era llevar a cabo un estudio para evaluar el efecto del uso de aguas de producción tratadas en el suelo y en el crecimiento, desarrollo y producción de cultivos, ganado y especies menores en el predio Área Sostenible Agroenergética (ASA), lo cual se hizo mediante un convenio de cooperación entre las dos instituciones.

De acuerdo con las tablas presentadas anteriormente, para considerar la "aptitud del agua" se contrastaron los resultados obtenidos con los parámetros establecidos en la Resolución 1207 de 2014, encontrando que el agua es apta para reúso agrícola. (Almansa-Manrique et al., 2018).

En el estudio también se evaluó una actividad que en el momento se encuentra por fuera de la Resolución 1207 de 2014 y es el consumo directo de agua tratada por animales bovinos y aves (Almansa-Manrique et al., 2018):

- Para los bovinos se evaluó la afectación en la ganancia de peso y producción de leche y se llevaron a cabo evaluaciones post mortem macroscópicas y microscópicas que arrojaron que no hubo afectación de la salud por el consumo de agua tratada ni algún cambio significativo.
- Para el caso de las aves se valoró el peso promedio por ave, ganancia de peso acumulada, número de huevos al día, porcentaje de postura al día, peso y tipificación del huevo y evaluaciones post mortem macroscópicas y microscópicas, donde tampoco se obtuvo información de alteración o afectación por el consumo de agua tratada.

En consecuencia, desde el punto de vista normativo, de acuerdo con las conclusiones del estudio, esta experiencia cumplió estrictamente con los parámetros descritos por la Resolución para el reúso agrícola. Así mismo, de los resultados obtenidos del reúso para consumo directo de bovinos y aves, el hecho de no encontrar efectos negativos abre la posibilidad de analizar la inclusión de nuevas actividades en la reforma a la Resolución actual.

5.2.1.2. Reúso de aguas Residuales tratadas municipio de Cerrito – Valle (Univalle, 2019)¹³⁹, (Rojas Gonzales, 2020)¹⁴⁰.

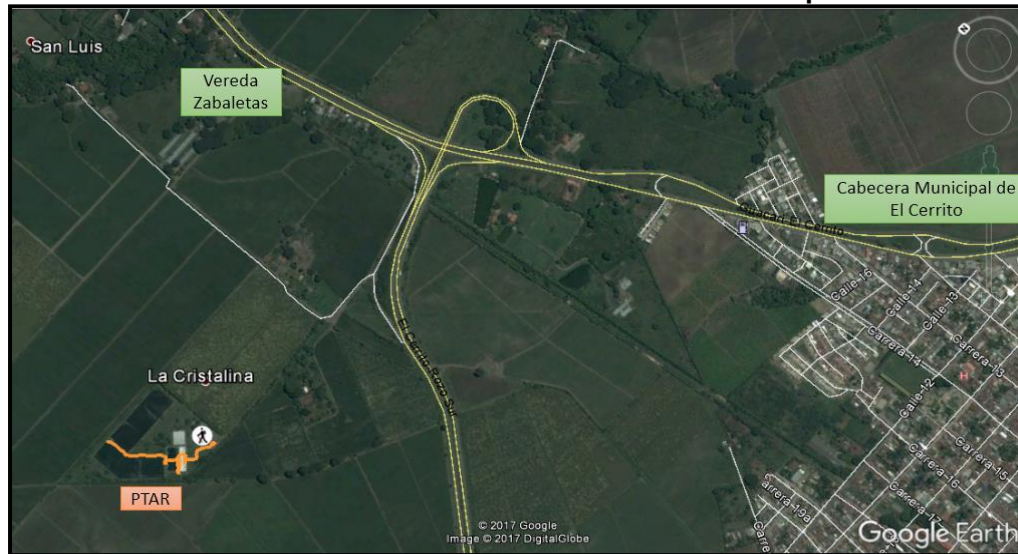
El municipio del Cerrito actualmente cuenta con una de las infraestructuras de tratamiento construidas para cumplir con los programas de descontaminación de las aguas residuales que impactan sobre el Rio Cauca de la CVC, en el Valle del Cauca.

El Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del municipio de El Cerrito está ubicado en la vía al corregimiento San Antonio. Se encuentra a una distancia aproximada de 1,54 km de la cabecera municipal, a 1 km de la vereda Zabaletas (corregimiento de Santa Helena) y 0.65 km de la vía Panamericana. Los predios colindantes a la planta son fincas con grandes extensiones de tierra cultivadas en caña de azúcar, entre ellas La Cristalina (Gráfico 115).

¹³⁹ Univalle – FNR- Información tomada con base en los documentos Evaluación Ambiental del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio del Cerrito y Evaluación Técnica del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales del Municipio del Cerrito Departamento Del Valle De Cauca

¹⁴⁰ Información suministrada por Ingeniero Sanitario Carlos Fernando Rojas González- Operador del sistema de tratamiento de aguas residuales. Marzo 2020.

Gráfico 115. Localización de la PTAR dentro del municipio del Cerrito



Fuente. Univalle- FNR (2019)

La planta de tratamiento recibe las descargas de las aguas residuales domésticas e industriales que se transportan en una red de alcantarillado combinado que producen un total de 15.000 suscriptores.

Los estudios y diseños de la PTAR iniciaron en 1997, el periodo de diseño es de 20 años, a partir de 2003, es decir que el periodo de vida útil de la PTAR es hasta el año 2023, para el cual la población proyectada fue de 50.919 habitantes (Suarez , 2010).

La PTAR fue construida y entregada en 2005, pero solo entró en operación en 2016; sin embargo, no se hicieron ajustes a las proyecciones iniciales de población que fueron realizadas en el año 1997. En todo caso, la población al año final de diseño de la PTAR es de 50.919 habitantes, que es mayor a los cerca de 36.000 habitantes que tiene actualmente el municipio en el área urbana, lo cual indica que la PTAR aún tiene la capacidad para tratar las aguas residuales de la cabecera municipal.

Con la construcción y puesta en marcha de la PTAR, todas las aguas residuales del municipio son conducidas para ser tratadas y, en consecuencia, se realiza un único vertimiento de aguas residuales sobre el río Sabaletas, pocos kilómetros antes de su desembocadura al río Cauca.

La CVC tiene registrado como caudal de diseño de la PTAR 90 L/s (Suarez, 2010), sin embargo, el diseño del vertedero de excesos tiene como caudal máximo a transportar hacia la planta de tratamiento 114L/s. Mediciones realizadas por contratista de la Alcaldía 2017 por cinco días cada una, mostraron que el caudal

de operación de la PTAR varía entre 59,16 a 87,43 L/s. El Gráfico 116 y Gráfico 117 muestran panorámica y fotos de la PTAR.

Gráfico 116. Panorámica PTAR El Cerrito



Fuente: Univalle FNR (2019)

Gráfico 117. Panorámica PTAR El Cerrito



Fuente Univalle- FNR (2019)

La PTAR está compuesta de las estructuras de entrada y el pozo de bombeo. A partir de este punto existen dos líneas de tratamiento, cada una compuesta por un tratamiento primario, Integrado por desarenadores (D) y dos lagunas anaerobias de alta tasa (LAAT), un sistema de manejo de lodos (en lechos de secado) y un sistema para el manejo de gases (biofiltro y quemador de gases); y un tratamiento secundario, compuesto por dos lagunas facultativas mejoradas con baffles (LFMCB). También cuenta con instalaciones complementarias que

corresponden a la unidad de operaciones, las zonas verdes de las lagunas y las cámaras de interconexión al interior del sistema.

El Gráfico 118 muestra fotos de varias unidades de Pretratamiento y los Gráfico 119 y Gráfico 120 presentan imágenes de las otras unidades de tratamiento.

Gráfico 118. Unidades Pretratamiento PTAR el Cerrito



Fuente: Univalle- FNR (2019)

Gráfico 119. Unidades de tratamiento secundario- lagunas anaerobias de alta Tasa



Fuente: Univalle- FNR (2019)

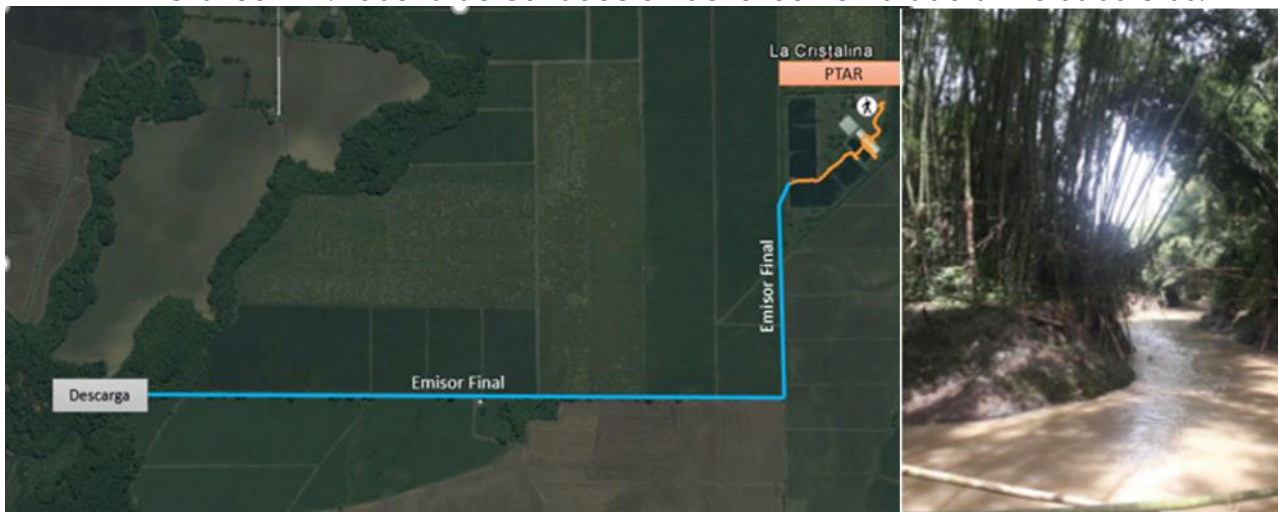
Gráfico 120. Lagunas facultativas – lechos de secado- biofiltro - tea



Fuente: Univalle- FNR (2019)

Las descargas de las aguas residuales tratadas se hacen al Río Sabaletas por un conducto rodeado de cultivos de caña en su mayoría del Ingenio Providencia (Rojas 2020), como se muestra en el Gráfico 121.

Gráfico 121. Tubería de conducción del efluente tratado al Río Sabaletas.



Fuente: Univalle- FNR (2019)

Los resultados del tratamiento implementado en el sistema de tratamiento de aguas residuales para el municipio del Cerrito se muestran en la Tabla 63, en la cual se especifica la calidad del efluente en condiciones normales del vertimiento desde el municipio.

Tabla 63. Calidad del efluente tratado y comparación normas de reúso

| Parámetro | Salida PTAR | Valor máximo (res1207/2014) | Valor máximo reúso de agua residual (Guía FAO) | | | WHO (organización mundial de la salud) - 2006 | |
|---|-------------|-----------------------------|---|--|-----------------------------|---|------------------|
| | | | Cultivos de consumo Directo (uso no restringid) | Cultivos que no se consumen y son procesados (uso restringido) | Cultivos que no se consumen | Uso no restringido | Uso restringido |
| pH (unidades) | 7,8 - 7,4 | 6,0 - 9,0 | 6,5-8,4 | 6,5-8,5 | 6,5-8,6 | | |
| Temperatura (°C) | 27,5- 26 | - | - | - | - | | |
| Conductividad eléctrica (µS/cm) | 200 - 195 | 1500 | - | - | - | | |
| DBO (mg/L) | 50,7 | - | < 10 | < 30 | < 30 | | |
| DQO (mg/L) | 98,5 | - | - | - | - | | |
| Sólidos sedimentables (mg/L) | 0,2 | - | - | - | - | | |
| Sólidos suspendidos (mg/L) | 43 | - | - | < 30 | < 30 | | |
| Nitratos (mg/L N-NO ₃) | 3,49 | 5 | - | - | - | | |
| Nitritos (mg/L N-NO ₂) | 0,0826 | - | - | - | - | | |
| Nitrógeno Amoniacal (mg/L N-NH ₃) | 0,458 | - | - | - | - | | |
| Nitrógeno total (mg/L N) | 5,93 | - | - | - | - | | |
| Ortofosfatos (mg/L P-PO ₄) | 2,68 | - | - | - | - | | |
| Fosforo total (mg/L P) | 3,02 | - | - | - | - | | |
| Grasas y aceites (mg/L) | 113 | - | - | - | - | | |
| Detergentes catiónicos SAAM (mg/L) | 2,5 | - | - | - | - | | |
| Sulfatos (mg/L SO ₄) | 252 | - | - | - | - | | |
| Coliformes totales (NMP/100mL) | 7000 | - | - | - | - | | |
| Coliformes fecales (NMP/100mL) | 1700 | 100000 | <14 | <200 | <200 | <10 ³ | <10 ³ |
| Huevos de nematodos (No /L) | N. D | - | <1 | - | - | <1 | <1 |

Fuente: Univalle - FNR (2019) y WHO (2006)

Los resultados encontrados en las condiciones normales del vertimiento (aguas residuales domésticas) muestran el potencial del agua residual para el reúso agrícola considerando la normatividad vigente (Resolución 1207 de 2014). Sin embargo, sería necesario hacer ajustes al tratamiento para cumplir la norma actual de reúso y los criterios establecidos por la FAO y la WHO para riego en cultivos restringidos (no se consumen directamente y requieren de proceso industrial). Los predios que rodean la PTAR y la línea de conducción son de caña de azúcar que corresponden a cultivos que van a tener un proceso industrial para que el producto final pueda ser consumido.

La zona utiliza agua subterránea concesionada para cultivos y según las referencias de las parcelas aledañas (Rojas 2020), podría comprarse el agua tratada para ser empleada en reuso agrícola. Se ha identificado que en la actualidad hay personas que llevan a cabo la actividad agrícola en los cultivos aledaños a la PTAR y utilizan corrientes de aguas cargadas de aguas residuales antes de ser tratadas, para abastecer la demanda hídrica de sus cultivos (caña de azúcar).

El Cerrito a la fecha asume directamente los costos del tratamiento de las aguas residuales y no tiene tarifas para el cobro a los usuarios del alcantarillado por el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, teniendo en cuenta lo previsto en las metodologías tarifarias de la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, los costos de operación deben ser incorporados en la tarifa de alcantarillado. Al implementar el uso del agua residual tratada para la agricultura agrícola, el Municipio no estaría obligado a pagar la tasa retributiva por vertimiento o vería reducido el monto a pagar, mientras que los usuarios de las aguas residuales tratadas no pagarían las tasas por uso del agua extraída de los pozos subterráneos, ni los gastos de extracción del agua subterránea. Adicionalmente, los posibles compradores del agua residual tratada, además de hacer el aprovechamiento del agua, pueden beneficiarse del contenido de nutrientes que tienen las aguas residuales tratadas (N y P), disminuyendo los costos de fertilizantes utilizados en sus cultivos. (Rojas 2020).

Actualmente, se adelantan estudios por parte de la Universidad del Valle, desde la facultad de Ingeniería Agrícola (Polanía & Tolorza , 2018) para evaluar los aspectos relacionados con el reuso en actividades agrícolas, buscando establecer elementos que aporten en las decisiones del municipio para viabilizar el proceso de reuso. En tal sentido, se busca responder a preguntas como:

- ¿Qué área se podría regar con el caudal del efluente proveniente de la PTAR de El Cerrito, para abastecer la demanda hídrica del cultivo de la caña de azúcar establecido en los predios aledaños a la misma?
- ¿Será apta la calidad agronómica del efluente de la PTAR de El Cerrito para riego, según su valoración por índices?
- ¿Estarían dispuestos los propietarios a realizar la inversión de implementar el riego con el agua residual tratada en la PTAR del El Cerrito, según el costo de venta estimado y los aportes que brinda el agua?

Los aspectos de calidad microbiológica y ambiental se han evaluado con la información tomada de las caracterizaciones de las aguas residuales tratadas, a la fecha (referenciados anteriormente), y de cuya evaluación se ha podido

establecer que con tratamientos complementarios de menor inversión a los ya establecidos se puede avanzar en el reúso seguro para el sector agrícola.

Esos trabajos de la Universidad del Valle tienen como respaldo estudios realizados de reúso agrícola a nivel nacional e internacional. La Tabla 64 muestra un resumen de las experiencias a nivel nacional basados en uso de agua residual tratada para la Agricultura.

Los estudios desarrollados por la Universidad del Valle para determinar el potencial de uso de las aguas residuales del Municipio de Ginebra (Valle) para los cultivos de caña de azúcar (Tróchez, 2017), mostraron que, una vez implementadas las medidas complementarias para lograr que el agua residual tratada alcance los criterios de calidad establecidos en la Resolución 1207 de 2014 (microbiológicos), para reúso con destinación a la agricultura, se lograría disminuir los costos para el usuario de las aguas residuales tratadas del orden de \$381.254.490 anuales. Esta estimación se realizó con los efluentes llevados a la Hacienda la Trinidad (donde se hicieron los estudios) por la disminución de costos de fertilizantes, los costos evitados de extracción y distribución de agua dulce y ahorro en el pago de tasa por uso de agua, mientras que para el generador (Municipio de Ginebra) se ahorrarían \$67.882.931 anuales por disminución en el pago de la tasa retributiva, entre otros.

Esta información permite contar con elementos fundamentales para el desarrollo de proyectos y estudios que conlleven a avanzar en la implementación de los procesos que permitan que los efluentes de agua residual tratados del municipio del Cerrito Valle del Cauca puedan incorporarse a procesos de reúso con destino al riego de la caña de azúcar.

A continuación, se muestra un resumen de algunas de las experiencias nacionales relacionadas con el reúso de agua residual tratada en agricultura.

Tabla 64. Experiencias nacionales relacionadas con la aplicación de aguas residuales tratadas en agricultura

| Objetivo de la aplicación | Cultivo y/o tipo de suelo | Concentraciones | Escala experimental | Resultados obtenidos | Autor (es) |
|---------------------------|---------------------------|--|---------------------|---|-------------------------------|
| Fuente de Nutrientes | Caña de azúcar | Agua residual: <ul style="list-style-type: none"> ● Calcio: 0,7034 meq/L ● Magnesio: 0,44 meq/L ● Sodio: 2,1 meq/L ● Bicarbonato: | Campo | Alto valor de coliformes fecales, por lo cual las directrices colombianas lo clasifican como no apto para riego; sin embargo, el efluente podría ser empleado | Trochez, (2017) ¹¹ |

| Objetivo de la aplicación | Cultivo y/o tipo de suelo | Concentraciones | Escala experimental | Resultados obtenidos | Autor (es) |
|---|---|--|---------------------|---|------------------------------------|
| | | 36,14 meq/L <ul style="list-style-type: none"> ● Sulfato 0,52 meq/L ● Nitratos 0,06 mg P/L ● Fósforo 7,82 mg P/L ● Nitrógeno 27,44 mg N/L ● Potasio 13,13 mg K/L ● Coliformes fecales: 1'606.640 UFC/100mL ● Cloruros: 59,2 mg CN/L | | de modo seguro siempre y cuando se le realice un tratamiento oportuno de desinfección. | |
| Impacto en los atributos químicos y macro nutricionales de un suelo | Caña de azúcar Tipo de suelo: inceptisol | Agua residual: <ul style="list-style-type: none"> ● CE: 0,64 dS/m ● pH: 6,75 ● Calcio: 30,22 mg/L ● Magnesio: 10,66 mg/L ● Sodio: 36,84 mg/L ● Bicarbonato: 175,42 mg/L ● Cloruros: 17,73 mg/L ● Sulfatos: 77,49 mg/L ● Nitratos: 12,60 mg NO₃/L ● N de Amonio: 23,58 mg NH₄/L ● Fosfatos: 1,40 mg PO₄/L ● Potasio: 8,05 mg/L ● DBO: 104 mg/L ● DQO: 268 mg Suelo: Propiedades Químicas: <ul style="list-style-type: none"> ● Calcio: 21,76 cmol/kg ● Magnesio: 8,07 cmol/kg ● Sodio: 0,34 cmol/kg ● CIC: 33,97 | Campo | <p>Tanto el agua subterránea como el efluente de la PTAR se clasifican como una buena calidad de agua fisicoquímica para el riego, con un riesgo moderado de salinidad (C2S1) y un riesgo moderado de sodicidad (CIS2). A excepción del NO₃., los componentes de aguas residuales cumplen con el límite máximo permisible en aguas residuales recuperadas en Colombia según la Resolución 1207 del 2014.</p> <p>Después de 12 meses de irrigar con aguas residuales tratadas, las propiedades del inceptisol cambiaron de la siguiente manera: las proporciones de Ca/Mg, Mg/K y Ca+Mg/K mejoraron ligeramente; la MO,</p> | Madera et al. (2015) ¹² |

| Objetivo de la aplicación | Cultivo y/o tipo de suelo | Concentraciones | Escala experimental | Resultados obtenidos | Autor (es) |
|---------------------------|---------------------------|--|---------------------|---|-----------------------------------|
| | | cmol/kg <ul style="list-style-type: none"> ● pH: 7,58 ● Ca/Mg: 2,7% ● Mg/K: 16,9% ● Ca+Mg/K: 62.6% ● CE: 213 μmho/cm Macronutrientes: <ul style="list-style-type: none"> ● MO: 41,16 g/kg ● P-Brayll: 54,53 mg/kg ● K: 0,54 cmol/kg ● N-NH₄: 0,69 mg/kg ● N-NO₃: 3,86 mg/kg | | Na, P y K aumentaron y el nitrógeno inorgánico (N-NH ₄ ;N-NO ₃) disminuyó considerablemente. El tipo de tratamiento no influyó en la variación de los atributos químicos en el suelo, ya que no se encontraron diferencias estadísticamente en comparación con los otros. Los resultados demuestran que no hay un impacto adverso en los atributos químicos del suelo debido a la reutilización de las aguas residuales en el riego de caña de azúcar. | |
| Fuente de Nutrientes | Caña de azúcar | Suelo: (pozo, TPA. TPC) Pozo: <ul style="list-style-type: none"> ● Materia orgánica: 3,0% ● N Total Kjeldahl: 0,15% ● P Total: 302,8 mg P/kg ● Coliformes Totales: 2,31x10⁶ UFC/g ● E. coli: 8,89x10⁴ UFC/g ● Huevos de Helmintos: <1 HH/g TPA: Agua residual tratada por Tratamiento Primario Avanzado <ul style="list-style-type: none"> ● Materia orgánica: 2,6% | Campo | Valores menores al final del cultivo (mes 12) con excepción de TPC el cual fue mayor, evidenciando que el agua residual permitió probablemente que se presentaran procesos de humificación de la materia orgánica, aumentando la misma. No obstante, el análisis estadístico mostró que el uso de las aguas residuales no influye significativamente en el contenido de la materia orgánica ni del nitrógeno al suelo en los 12 meses del cultivo. | Silva et al. (2014) ¹³ |

| Objetivo de la aplicación | Cultivo y/o tipo de suelo | Concentraciones | Escala experimental | Resultados obtenidos | Autor (es) |
|--|--------------------------------------|--|---------------------|--|------------------------------------|
| | | <ul style="list-style-type: none"> ● N Total Kjeldahl: 0,13% ● P Total: 361,9 mg P/kg ● Coliformes Totales: 4,15x10⁶ UFC/g ● E. coli: 7,56x10⁴ UFC/g ● Huevos de Helminetos: <1 HH/g <p>TPC: Agua residual tratada por Tratamiento Primario Convencional</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Materia orgánica: 4,1% ● N Total Kjeldahl: 0,20% ● P Total: 314,8 mg P/kg ● Coliformes Totales: 5,94x10⁶ UFC/g ● E. coli: 8,17x10⁴ UFC/g ● Huevos de Helminetos: <1 HH/g | | | |
| Impacto en la productividad con irrigación | Caña de azúcar Variedad: CC 85-92 | <p>Agua residual:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● CE: 0,47 dS/m ● pH: 6,85 ● Calcio: 1,85 meq/L ● Magnesio: 0,97 meq/L ● Sodio: 2,36 meq/L ● Bicarbonato: 2,79 meq/L ● Ras ajustado: 2,13 ● Nitritos: 0,75 mg NO₂/L ● Nitratos: 9,72 mg NO₃/L | Campo | La productividad media alcanzada en el tratamiento con agua residual tratada fue de 134,7 TCH y de acuerdo con el Anova aplicado, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos (T1: efluente PTAR-C, T2: Pozo, T3: Pozo más fertilización química), por lo que la productividad alcanzada con esta calidad de agua (T1) puede ser equivalente | Madera et al. (2012) ¹⁴ |

| Objetivo de la aplicación | Cultivo y/o tipo de suelo | Concentraciones | Escala experimental | Resultados obtenidos | Autor (es) |
|---------------------------|---------------------------|--|---------------------|--|---------------------------------|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • N de Amonio: 2,56 mg NH₄/L • N Total Kjeldahl: 4,03 mg N/L • N Total: 15,03 mg/L • Fósforo Total: 1,00 mg/L • Fosfatos: 0,53 mg PO₄/L • Potasio: 6,85 mg/L | | a la obtenida con fertilización química (T3). | |
| Fuente de Nutrientes | Caña de azúcar | <p>Agua residual:</p> <ul style="list-style-type: none"> • pH: 6,66 • CE: 0,62 dS/m • Calcio: 1,58 meq/L • Magnesio: 0,83 meq/L • Sodio: 1,65 meq/L • Bicarbonato: 3,12 meq/L • Cloruro: 1,04 meq/L • Sulfato: 1,03 meq/L • Nitritos: 1,69 mg [(NO)]₂/L • Nitratos: 53,73 mg [(NO)]₃/L • N Amoniacal: 15,83 mg [(NH)]₃/L • Fósforo Total: 5,03 mg P/L • Fosfatos: 2,09 mg PO₄/L • N Total: 75,19 mg N/L | Campo | Suelos libres de salinidad y con menor riesgo de sodicidad; valores óptimos dentro de las normas de calidad de agua para agricultura establecidos por la FAO y USDA y no se encontraron alteraciones en cuanto a la productividad. | Echeverri, (2011) ¹⁵ |

¹¹ Tróchez, J. (2017). Evaluación del potencial uso para riego del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ginebra Valle del Cauca. Trabajo de grado. Universidad Del Valle, Cali, Colombia. Págs.: 19 y 41.

¹² Madera Carlos et al (2015), Reúso de aguas residuales: Impacto en los atributos químicos y macro nutricionales en un suelo inceptisol irrigado con aguas residuales tratadas. Escuela EIDENAR. Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Cali y Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad sur colombiana, Neiva.

¹³ Silva, J., Torres, P., Madera, C. (2014). Reutilización de aguas residuales tratadas en la agricultura: una oportunidad para el sector cañero. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Universidad del Valle. Cali, Colombia. Págs.: 19-22.

¹⁴ Madera, C. A., Pérez, C. F., Echeverri, A. F., & Urrutia, N. (2012). Reúso de aguas residuales domésticas: impacto en la productividad de la caña de azúcar variedad CC 85-92. *Ingeniería Y Región*, 9, 47-52.

¹⁵ Echeverri, A. (2011). Reúso para riego del efluente de la PTAR-C: Evaluación del potencial impacto en las propiedades físicas del suelo y la productividad de la variedad de caña de azúcar CC85-92. Tesis de Maestría. Universidad Del Valle, Cali, Colombia. Pp: 52.

Fuente: Polanía, Tolorza 2018

Entre las dificultades señaladas para la gestión adecuada del sistema de tratamiento y lograr una calidad estable y continua para el reúso se señalan las siguientes (Rojas Gonzales, 2020);

- Descargas industriales de curtiembres que tienen asiento en la cabecera municipal y que no tienen sistemas de tratamiento para control de sus descargas. Estos vertimientos desestabilizan el tratamiento de las bacterias en la laguna de alta tasa anaerobia, lo que obliga a mantener procesos de reinoculación continua con bacterias al sistema, elevando los costos de tratamiento y dificultando mantener las eficiencias logradas en condiciones normales de operación.
- Al ser un alcantarillado combinado, en épocas de lluvias ingresan cargas diluidas al sistema de tratamiento que limitan la operación del sistema, que está diseñado para cubrir las necesidades de alimento de los microorganismos del tratamiento sobre una base de carga orgánica que no llega al estar diluida. Adicionalmente, ese efluente llega con contenidos de oxígeno disuelto que afectan el desempeño de la laguna anaerobia de alta tasa.
- Los costos de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento están siendo cubiertos por el municipio no hay ingresos por las tarifas que se cobran a los usuarios del servicio de alcantarillado (no se ha establecido aún ese mecanismo).
- Al ser un sistema de tratamiento a cargo del municipio, está influenciado por las decisiones del mandatario local, lo que afecta la continuidad del tratamiento si decide no cubrir los costos de operación y mantenimiento de la PTAR en cabeza de contratistas que vienen realizados trabajos desde otras administraciones anteriores.¹⁴¹

¹⁴¹ A la fecha de elaboración del presente informe, el Operador de la PTAR Carlos Fernando Rojas que estuvo desde el arranque y estabilización de la PTAR, fue notificado por la Alcaldía de la suspensión del contrato y a la fecha el sistema opera sin dirección técnica y a cargo de operadores que no están debidamente calificados para adelantar el tratamiento requerido.

Aplicación de la normatividad vigente

Como se señaló anteriormente, los parámetros revisados corresponden a los del agua tratada que se vierte al río Sabaletas, por lo que en la actualidad no hay reúso en los términos de la Resolución 1207 de 2014. Es importante señalar que, en la actualidad, hay productores agrícolas haciendo uso de aguas residuales antes de recibir tratamiento para suplir parte de su demanda hídrica, lo cual es contrario a lo previsto en el marco normativo vigente.

El caso descrito no es el único estudio o búsqueda de oportunidades para reúso en el departamento, pues se han desarrollado diferentes investigaciones para efectos de identificar las posibilidades existentes. Por ejemplo, en el marco del proyecto para el reúso potencial del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales Cañaveralejo en el municipio de Santiago de Cali (Potential Reuse of Effluent from the Cañaveralejo Wastewater Treatment Plant – WWTP-C) en cultivos de caña de azúcar en el Valle del Cauca, se cumplió con los parámetros internacionales de la FAO del año 1985 y también con los estándares de la Resolución 1207 de 2014 para el reúso agrícola, salvo por el componente de NO_3 ¹⁴², por lo que el estudio arrojó que no hubo impacto negativo en los atributos químicos del suelo por el reúso de agua en la irrigación de caña de azúcar (Pérez et al., 2015).

5.2.2. Reúso Industrial

5.2.2.1. Reúso de aguas residuales tratadas de Bavaria en actividades productivas de CEMEX y en procesos internos de las mismas Cervecerías¹⁴³

Bavaria en la actualidad realiza el tratamiento de las aguas residuales en sus diferentes plantas industriales, con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en la Resolución 631 de 2015 y a criterios de calidad más exigentes en lugares donde estos se les exigen, como es el caso de la Cervecería Tocancipá. La norma de vertimientos de la CAR para este tramo del Río Bogotá (Resolución 1618 de 2015) es más exigente que la Resolución 631 de 2015. Para lograr estos objetivos, se requiere avanzar a tratamientos terciarios de las aguas residuales.

El sistema implementado consiste en un conjunto de tratamientos como se muestran en el Gráfico 122. Está conformado por un sistema preliminar – primario a

¹⁴² Los nitratos son contaminantes comunes que se encuentra en el agua y que puede provocar efectos nocivos en la salud si se consume en altos niveles.

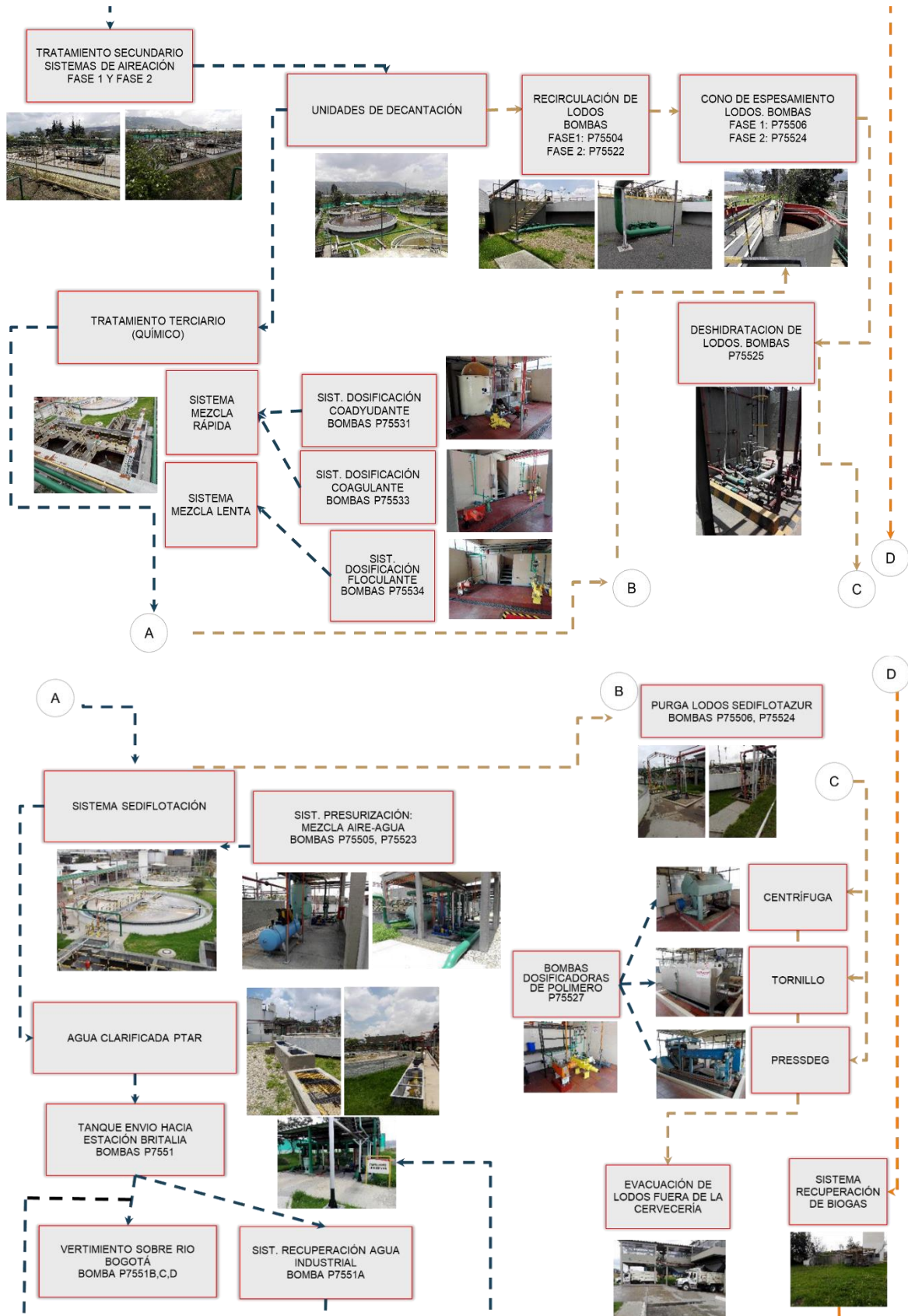
¹⁴³ La documentación de esta experiencia se basa en la información suministrada por la Gerente de Sostenibilidad de Bavaria S.A., Carolina García Arbeláez y del Ingeniero Químico - Environmental ZBS Middle Américas Zone. Jaime Toquica Wilches. - abril de 2020

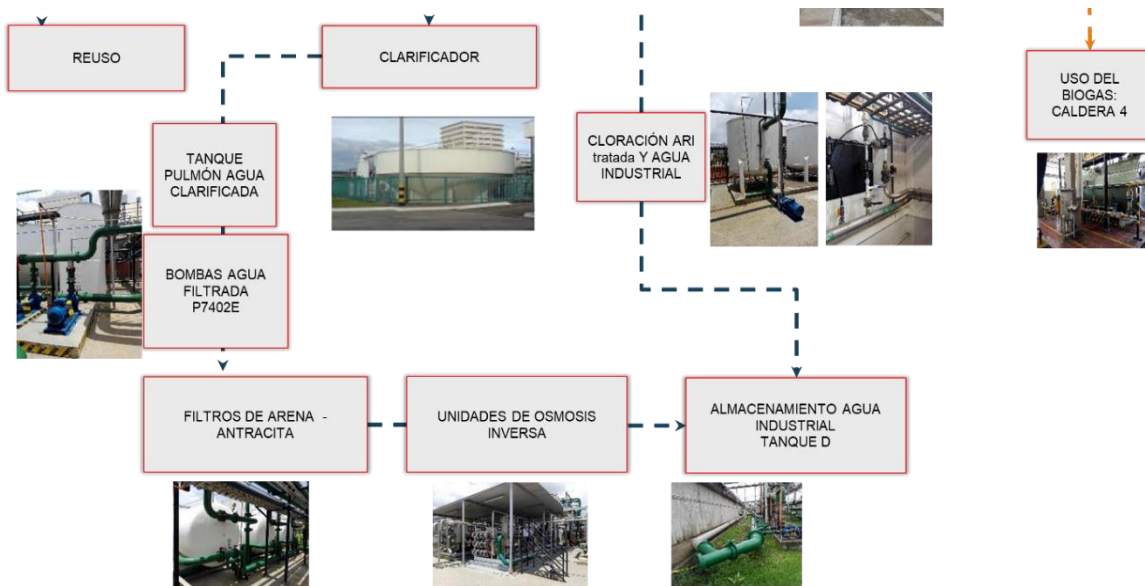
base de tanque de equalización, bombeo, tamizado, desarenadores y neutralización. El efluente es posteriormente llevado a un sistema secundario a base de reactores anaerobios tipo UASB e IC (alta tasa) y un sistema aerobio de lodos activados, con decantación secundaria. El efluente pasa posteriormente a un tratamiento químico (coagulación- floculación) y un sistema de sediflotación, para su entrega a un tanque de almacenamiento agua clarificada que descarga una parte como vertimiento tratado al río Bogotá y otra parte para continuar con un tratamiento avanzado para recirculación interna (un 40% aproximadamente) en los procesos permitidos dentro de la Cervecería. El tratamiento se complementa con un sistema de manejo de lodos para su disposición como residuo y un sistema de tratamiento y aprovechamiento del biogás generado.

El tratamiento avanzado también se realiza en la Cervecería del Valle incluyendo ultrafiltración y ósmosis inversa.

Gráfico 122. Tratamiento de aguas residuales- Bavaria Tocancipá







Fuente: Bavaria S.A.

El tratamiento avanzado en la cervecería de Tocancipá consiste en un sistema de clarificación, un sistema de filtración arena antracita, un tratamiento de osmosis inversa, un sistema de almacenamiento de agua tratada y un sistema de desinfección a base de cloro para su recirculación al interior de los procesos autorizados.

Los resultados del tratamiento terciario para su vertimiento al río Bogotá, se muestran en la Tabla 65.

En la Tabla 66 se presentan algunos de los parámetros evaluados con base en las especificaciones requeridas por el Corporativo internacional de ABInBev para la recirculación de agua residual tratada con el tratamiento avanzado para los procesos autorizados.

Tabla 65. Caracterización agua residual tratada para vertimiento al Río Bogotá

| Variable | Unidades | Lcm ¹ | Resultado | Resolución 1334 del 2017 ⁴ |
|--------------------|-------------------------|------------------|-----------|---------------------------------------|
| Aceites y Grasas | mg Aceites Grasas /L | 1,0 | <1,0 | 2,1 |
| Acidez Total | mg CaCO ₃ /L | 10,0 | < 10,0 | N.R |
| Alcalinidad Total | mg CaCO ₃ /L | 5,0 | 1700 | N.R |
| Cloruros | mg Cl/L | 5,0 | 187 | N.R |
| Coliformes Totales | NMP/100mL | N.A. | 920 | 5000 |
| Coliformes Fecales | NMP/100mL | N.A. | 7,8 | 1000 |

| Variable | Unidades | Lcm ¹ | Resultado | Resolución 1334 del 2017 ⁴ |
|--|---------------------------|------------------|---------------|---------------------------------------|
| Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO ₅ | mg O ₂ /L | 5,0 | 16,0 | 16 |
| Demanda Química Oxígeno — DQO | mg O ₂ /L | 20,0 | 44,9 | 46 |
| Dureza Cálcica | mg CaCO ₃ /L | 10,0 | 20,0 | |
| Dureza Total | mg CaCO ₃ /L | 10,0 | 29,5 | N.R |
| Fenoles Totales | mg Fenoles/L | 0,1 | <0,1 | N.R |
| Ortofosfatos | mg P-P04 ³⁻ /L | 0,05 | 2,34 | N.R |
| Fósforo Total | mg P/L | 0,05 | 3,07 | N.R |
| Nitratos | mg N03-N/L | 0,1 | 5,89 | N.R |
| Nitritos | mg NO ₂ N/L | 0,005 | 0,00801 | N.R |
| Nitrógeno Amoniacal | mg N-NH ₃ /L | 2,0 | <2,0 | N.R |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | mg NTK/L | 4,0 | <4,0 | N.R |
| Nitrógeno Total | mg N/L | N.A | 7,68 | N.R |
| Tensoactivos | mg SAAM/L ³ | 0,4 | <0,4 | 0,5 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg SST/L | 10,0 | <10 | 40 |
| Sulfatos | mg S04 ²⁻ /L | 15,0 | 63,3 | N.R |
| pH ² (Mín -máx.) | Unidades de pH | N.A. | 8,32 - 8,61 | 6 - 9 |
| Temperatura ² (Mín. máx.) | °c | N.A. | 16,9-21,8 | N.R |
| Oxígeno disuelto ² (Mín - máx.) | mg OD/L | N.A. | 6,3 -7 1 | N.R |
| Sólidos Sedimentables ² (Mín. - máx.) | mL/L | N.A. | <0,1- <0,1 | N.R |
| Conductividad ² (Mín. - máx.) | µS/cm | N.A. | 3800 - 3992 | N.R |
| Caudal ² (Mín. - máx.) | L/s | N.A. | 30,91 - 48,66 | N.R |
| Caudal ² (Promedio) | L/s | N.A. | 38,85 | 100 |

¹ LCM - Límite de cuantificación del método. Es el valor mínimo cuantificable con el método utilizado para la determinación de la variable.

² Variable medida en campo.

³ Calculado como LAS, peso molecular 288,4

⁴Resolución de norma de vertimiento para Bavaria Tocancipá.

Tabla 66. Condiciones Calidad de agua residual tratada con tratamiento avanzado para recirculación en procesos productivos autorizados

| Ítem | Parámetro | Un | Osmosis inversa | |
|------|---|--------|--|--|
| | | | Condiciones de calidad de agua entrada | Condiciones de calidad de agua entregada |
| 1 | Turbiedad | UNT | 1 | 0,3 |
| 2 | Solidos Suspendidos | mg/l | 5 | 0 |
| 3 | Conductividad | µs/cm | 4200 | 205 |
| 4 | pH | UN | 7,96 | 7 |
| 5 | DBO ₅ | mg/l | 10 | Ausentes |
| 6 | E. Coli | UFC/ml | Ausentes | Ausentes |
| 7 | Cloro Libre | mg/l | 0 | 0 |
| 10 | Dureza Total | mg/l | 30 | 10 |
| 11 | SDI - Índice de densidad de Ensuciamiento | UN | | |
| 13 | Hierro Total | mg/l | 0,22 | 0,025 |
| 14 | Temperatura Agua | °C | 17 | 16 |
| 15 | Alcalinidad | mg/l | 2000 | 63 |

Fuente: Bavaria S.A.

Los resultados del tratamiento avanzado muestran que la empresa cumple con parámetros establecidos para su uso a nivel interno.

Bavaria S.A. informa también que los costos totales de instalación de la tecnología para el tratamiento del efluente recibido crudo de la Cervecería hasta su entrega con la calidad requerida para las actividades autorizadas por la empresa, asciende a USD 100.000/m³/h. Los costos de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento avanzado son del orden USD 0,65/m³ (o USD 0,032/hl – Unidad de producción), que sumado a los tratamientos previos implican un costo total de tratamiento del agua residual del orden de 1,65 USD/m³.

Adicionalmente a este proceso de recirculación interna de las aguas residuales tratadas, Bavaria y Cemex de Colombia en un proyecto denominado como “simbiosis industrial” han avanzado en un proyecto piloto para hacer el reúso de un volumen potencial de 1.500 m³/mes del agua residual tratada que es vertida por Bavaria al río Bogotá, para que sea empleada en la producción de concreto y el lavado de vehículos en la planta de concreto de Cemex en Tocancipá.

El Gráfico 123 muestra un detalle de la ubicación geográfica de las 2 plantas para su implementación del Proyecto, una vez se superen las limitaciones que la normatividad actual tiene para su desarrollo.

Gráfico 123. Ubicación geográfica Bavaria – Cemex Tocancipá



Fuente: Bavaria S.A.

CEMEX tiene como actividad económica la producción y comercialización de concreto en el municipio de Tocancipá.

Las actividades principales de la planta son:

- Recepción y almacenamiento de materias primas.
- Dosificación y cargue de materias primas (agua, aditivos, material pétreo y cemento).
- Producción de concreto. (Mezcla)
- Entrega de concreto

Actualmente, la planta utiliza agua potable como materia prima para la producción de concreto y para el lavado de los vehículos.

Cemex realizó pruebas con las aguas residuales tratadas por Bavaria S.A en Tocancipá, provenientes del vertimiento de las aguas residuales al Río Bogotá y ha

encontrado que cumple con las condiciones de calidad del agua requerida para su proceso industrial.

Los beneficios del reúso del agua tratada, según señala Bavaria S.A., no son económicos, y lo relacionan como parte de la estrategia empresarial de ahorro y uso eficiente de agua para minimizar la presión sobre el recurso hídrico que genera la concesión de agua de la cervecería en el municipio de Tocancipá. De hecho, indican que a nivel interno es más económico utilizar agua tratada proveniente de la concesión (0,2 U\$/m³), que utilizar la de recirculación con tratamiento avanzado que resulta más costosa (del orden de 1,65 U\$/m³).

Tampoco se consideran beneficios económicos por la entrega de agua residual tratada a Cemex, y de realizarse el proyecto, los costos que se ahorraría Cemex por compra de agua potable al municipio podrían ser hasta aproximadamente de 50 millones de pesos al año, ahorro que se destinaría para inversión en proyectos de protección y recuperación del recurso hídrico, por ejemplo, el Fondo de agua Bogotá.

Para el desarrollo del proyecto, Cemex debe instalar una tubería para conectarse a la tubería de descarga del vertimiento de Bavaria al Río Bogotá, pues de lo contrario implicaría realizar más de 100 viajes de mixers al mes para llevar el agua tratada desde Bavaria a Cemex. Para la construcción de la tubería existen dos alternativas: La primera es la instalación de una Tubería de aproximadamente 80 metros debajo de la línea del ferrocarril, para lo cual se requiere permiso de Ferrocarriles Nacionales y la segunda alternativa es instalar una tubería de aproximadamente 120 metros por debajo de la autopista norte, para lo cual se requiere permiso de la Concesión Vial de la Autopista. El Gráfico 123 muestra el detalle de las alternativas.

Aplicación de la normatividad vigente

Para el caso de Bavaria S.A., las condiciones actuales del reúso se consideran complejas y restrictivas. Como consecuencia de esto, no han podido avanzar en la implementación de proyectos de reúso, entre ellos el ya mencionado esquema conjunto con CEMEX.

Para ilustrar en más detalle cuáles han sido las barreras del reúso para la empresa, en las comunicaciones recibidas señalan una serie de dificultades para implementar proyectos de reúso, las cuales se mencionan a continuación:

- El reúso implica requisitos legales complejos: Es necesario tramitar la modificación de la concesión de agua y del permiso de vertimientos, pues

la Resolución 1207 de 2014 en el Artículo 3 establece que es necesario realizar estos trámites ante la autoridad ambiental competente. Como se indicó anteriormente en el análisis del contexto jurídico, estos trámites toman tiempo y requieren de un esfuerzo técnico que desincentiva el reúso.

- Criterios de calidad altos: Para la empresa, los parámetros de calidad exigidos por la norma (Resolución 1207 de 2014, Artículo 7) no son acordes con el uso o aplicación del agua, por lo que la reutilización de agua se hace muy costosa y poco eficiente.

De igual manera, Bavaria S.A. señala aspectos que considera se deben reevaluar dentro de la normativa actual y algunas sugerencias a incorporar en una nueva reglamentación, así:

- Se debe incluir el concepto de recirculación en la norma con el fin de diferenciarlo del reúso interno y de esta manera promover la gestión integral del recurso hídrico.
- Es necesario flexibilizar todos los requisitos y trámites administrativos exigidos por la norma, puesto que muchos de ellos son innecesarios y/o de muy difícil cumplimiento, por lo que podría pensarse en un trámite único que permita agilizar el proceso y permitir el reúso de forma confiable y rápida incentivando su realización tanto para los usuarios generadores como para los usuarios receptores.
- Los requisitos técnicos establecidos actualmente en la resolución no permiten el cumplimiento de sus objetivos, sino que, por el contrario, al ser tan estrictos para todas las actividades de reúso se desincentiva esta actividad. Por ello, deberían establecerse unos requisitos mínimos para todas las actividades (o podrían utilizarse los establecidos en la Resolución 631 de 2015) y cada sector debería ser el que determine los parámetros de calidad del agua residual que necesita para el desarrollo de sus actividades.
- Los límites a los usos de aguas residuales tratadas son muy fuertes, por lo que muchas actividades en las que técnica y tecnológicamente podría realizarse reúso hoy en día no son permitidas, impidiendo de esta manera que usuarios generadores encuentren usuarios receptores de sus aguas residuales tratadas.
- La resolución no incluye incentivos administrativos ni financieros para el reúso y, por el contrario, restringe la posibilidad de que el usuario generador cobre por el tratamiento de las aguas residuales, lo que genera un desincentivo al

ser el usuario generador el que debe cubrir todos los costos de tratamiento y transporte de las aguas residuales tratadas sin que el usuario receptor tenga una participación en esos costos.

De acuerdo con las dificultades y sugerencias formuladas por la Empresa, se concluye que la normativa actual de reúso se distancia de los intereses del sector productivo, desincentiva el reúso por la pluralidad de requisitos exigidos y carece por completo de incentivos, lo que termina por hacer inoperativa la política.

5.2.3. Reúso Doméstico

Actualmente en Colombia no existen casos referidos de reúso directo de agua residual tratada para consumo doméstico debido a que la normatividad vigente no lo permite.

Sin embargo, el reúso para consumo doméstico indirecto es realizado en la mayoría de los municipios del país de manera no planificada, ya que captan sobre un cuerpo de agua superficial ubicado aguas abajo de las descargas de otros municipios o proyectos productivos industriales y mineros, que realizan el vertimiento a ese mismo cuerpo de agua.

Ejemplos importantes de estos casos son las ciudades y municipios que hacen uso del río Cauca como fuente de abastecimiento para consumo doméstico. La ciudad de Cali realiza la captación del agua del río Cauca para su potabilización en la Planta de Puerto Mallarino, aguas abajo de una de las descargas provenientes de la PTAR de Cañaveralejo, en la cual se realiza el tratamiento parcial de las aguas residuales que transporta el Canal Sur, provenientes de los vertimientos de un sector de la ciudad de Cali. Adicionalmente, el río en ese punto ha recibido descargas de municipios importantes ubicados al norte del Cauca y sur del Valle del Cauca, y de sectores industriales como ingenios azucareros, manufactura, papel y sector minero.

Igualmente, aguas abajo de la ciudad de Cali, se captan aguas para riego o su potabilización, por parte de importantes Empresas del sector industrial manufacturero, de bebidas y alimentos y otros municipios ubicados a lo largo de la cuenca hasta su desembocadura en el Río Magdalena.

Esta condición se puede verificar con lo especificado por indicadores establecidos en el país, como el índice de calidad del agua (ICA)¹⁴⁴ del Río Cauca.

¹⁴⁴ ICA. Índice de calidad del agua que señala las condiciones de calidad de una corriente de agua al momento de una medición. Está calculado con base en las variables Oxígeno Disuelto (OD), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los Sólidos Suspendidos totales (SST) la Conductividad Específica (CE), el pH, y la Relación (NT/PT).

Según se señala en el Estudio Nacional del agua de 2018¹⁴⁵ al paso por Cali y hasta su desembocadura está catalogado como regular y en algunos sectores como malo, lo que lo ubica como una corriente de agua con deficiente condición para su uso (reúso indirecto) para consumo doméstico.

De igual manera, en el río Magdalena se hace también reúso indirecto no planificado de agua residual, pues se ubican sistemas de riego y captación para potabilización de agua de consumo humano en importantes ciudades que están ubicadas a lo largo del territorio nacional por donde fluye el río hasta su desembocadura en el mar. En este recorrido recibe las descargas directas o indirectas de los vertimientos sin tratamiento o con sistemas de tratamiento de baja eficiencia de las aguas residuales producidas por la mayoría de la población y de la zona productiva ubicada especialmente en la región andina.

El Índice de calidad del agua para el Río Magdalena, de acuerdo con el Estudio Nacional del agua de 2018¹⁴⁶, después de la descarga del Río Bogotá al Río Magdalena en Girardot y hasta su desembocadura en el mar, está catalogado como regular, lo que lo ubica también como una corriente con deficiente condición para su uso (reúso indirecto) en consumo humano.

Esta situación es similar para muchas otras cuencas de ríos utilizados para consumo doméstico y riego que presentan la misma condición descrita para los ríos Cauca y Magdalena.

5.3. Recomendaciones para la implementación del reúso de agua en Colombia

5.3.1. Recomendaciones técnicas

Estas recomendaciones están asociadas a las limitaciones de carácter técnico que se encontraron en los tratamientos de origen doméstico para cualquier tipo de reúso, dado que existen varias condiciones que no permitirían en el corto y mediano plazo implementar el reúso desde este origen.

Entre estas limitaciones se destacan las siguientes:

¹⁴⁵ Estudio Nacional del Agua-2018. IDEAM. Marzo de 2019. Pág.243

¹⁴⁶ Ídem. Pág.244.

5.3.1.1. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Según Superservicios y DNP 2019¹⁴⁷, el caudal total tratado de aguas residuales por los prestadores del servicio público de alcantarillado a cargo de los Sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) urbanos y rurales del país, para el año 2018 correspondió a 28,95 metros cúbicos por segundo (m³/s). En términos del indicador de tratamiento de aguas residuales propuesto por el Viceministerio de Agua potable y Saneamiento Básico y el Departamento Nacional de Planeación, este caudal depurado corresponde al 42,8% respecto al total del caudal estimado vertido en el país proveniente de los sistemas de alcantarillado.

Esto representa una situación limitante para la implementación del reúso de agua residual doméstica en el país, ya que como se puede observar, más del 50 % de los vertimientos no cumplen con los requerimientos de calidad de agua establecidos para el reúso, además de generar impactos negativos al cuerpo de agua que recibe estas descargas y que posteriormente es utilizado como fuente de agua para cultivos (reúso indirecto).

Una de las principales recomendaciones para favorecer la implementación del reúso directo e indirecto en el país, es construir sistemas de tratamiento de aguas residuales en los municipios de Colombia y optimizar los sistemas que existentes que no operan o lo hacen de manera ineficiente. La existencia de sistemas que cumplan con la Resolución 631 de 2015, permitirá disminuir las cargas contaminantes que llegan a los cuerpos de agua, mejorando la calidad del agua, que posteriormente es utilizada para actividades de riego y consumo doméstico.

Es necesario que en la selección de tecnologías de tratamiento se tenga en cuenta las condiciones particulares de cada región, en cuanto a caudales, temperatura, cargas contaminantes, tipo de vertimiento, costos de inversión (CAPEX), operación y mantenimiento (OPEX), disponibilidad de terreno, existencia de sistemas en operación y otros de carácter socio ambiental que permitan establecer la mejor opción para cada caso en particular.

Es importante asegurar la sostenibilidad en la operación de los sistemas de tratamiento que se construyan, para lo cual se debe contar con tarifas que cubran los costos de operación y mantenimiento. Algunas experiencias en el país muestran que algunos municipios que cuentan con estos sistemas de tratamiento han fallado por decisiones políticas del alcalde y directivas municipales de turno. Estas

¹⁴⁷ Estudio Sectorial de los Servicios Públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2018. Superintendencia de servicios públicos domiciliarios y DNP. Diciembre de 2019. Pág. 96.

autoridades por condiciones particulares asociadas a su percepción personal o política acerca de esta operación realizan suspensión de trabajos a operadores de las PTAR, afectando los resultados esperados con el funcionamiento del sistema de tratamiento instalado.

Se recomienda crear una entidad descentralizada que pueda manejar el Proyecto como un modelo de negocio que facilite la operación del sistema y para ello es importante revisar y conocer en detalle los modelos que se han implementado en otros países en tal sentido, como ha sido el caso de Estados Unidos, México y otros que han avanzado en el reúso, especificados en otros apartes del presente estudio.

5.3.1.2. Efluentes combinados de aguas residuales domésticas y aguas lluvias

Dentro de los Programas de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV), se ha planteado como objetivo la implementación de sistemas de alcantarillados separados donde se dividan los efluentes de aguas residuales domésticas y de aguas lluvias. Sin embargo, este objetivo no se ha desarrollado eficientemente en el país, ya que los vertimientos que llegan a los sistemas de tratamiento de aguas residuales son combinados. Cuando se presentan los eventos de precipitación, a los sistemas de tratamiento de las aguas residuales domésticas llegan volúmenes de agua que no corresponden a los esperados para ser tratados en los sistemas construidos y pueden ocasionar el lavado de los microorganismos, lo cual afecta negativamente el trabajo de los mismos y la eficiencia de los sistemas de tratamiento, obligando a realizar nuevamente la puesta en marcha del tratamiento.

Estos eventos pueden ser manejados sin la implementación total de la separación de redes, pero elevan los costos de tratamiento, pues los excesos diluidos con aguas lluvias en los sistemas combinados generan costos de inversión, operación y mantenimiento. Lo anterior ocasiona que se deba desviar el efluente a tratamientos fisicoquímicos que operarán de forma diferente a los de tratamiento biológico.

Se recomienda seguir avanzando en el desarrollo de los programas de saneamiento y manejo de vertimientos, y la construcción de redes de alcantarillado separadas, sanitario y pluvial, para poder operar eficientemente los sistemas de tratamiento, lo cual permitirá una mayor eficiencia de remoción de contaminantes y un mejor diseño de nuevas construcciones de estos sistemas.

5.3.1.3. Vertimientos industriales descargados a las redes municipales sin tratamiento ni control

Bajo ciertas circunstancias y por operaciones productivas de baja tecnología, se presentan en muchas ciudades y municipios, vertimientos incontrolados a los alcantarillados municipales desde industrias que no dan cumplimiento a las normas de vertimientos establecidas por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible y a los controles ejercidos por las autoridades ambientales competentes. Estos efluentes generan cargas orgánicas y químicas que afectan los sistemas de tratamiento existentes, ocasionando problemas en el proceso de tratamiento instalado, lo cual conlleva a una operación inadecuada y al incumplimiento de las normas de vertimiento.

Muchas de estas industrias son artesanales y persiste su operación bajo condiciones deficientes, sin que las autoridades competentes puedan intervenir de manera efectiva, dadas las circunstancias sociales que rodean la mayoría de estas empresas.

Es necesario avanzar en los programas de producción más limpia y control de contaminación en la fuente de generación del vertimiento industrial. Las empresas de servicios públicos deben ejercer una vigilancia más eficiente sobre sus usuarios para identificar y controlar aquellos cuyas descargas no cumplan con la normativa y que puedan afectar la eficiencia de los proyectos de tratamiento de aguas residuales que se construyen. De igual manera, se deben estudiar alternativas de intervención sobre aquellos que no se acojan al sistema establecido para lograr su incorporación a los procesos de manejo y control de los vertimientos o su cierre definitivo si el contexto socioeconómico lo permite.

5.3.1.4. Efluentes del uso agropecuario

Este tema no ha sido referenciado dentro del proyecto dada la escasa información y conocimiento que se tiene acerca del uso del recurso hídrico en el país en ese campo. La baja tecnología para el uso del agua en los distritos de riego y en la mayoría de los sectores agrícolas, así como el uso incontrolado de fertilizantes y plaguicidas para manejar la productividad del agro, dan lugar a que el impacto de las descargas sobre los cuerpos de agua sea una gran limitante para su reúso indirecto, por los restrictivos niveles de concentración de los parámetros de control que determinan su aplicación en una u otra actividad.

Los principales efectos de los plaguicidas se deben a su alta toxicidad, estabilidad, persistencia, movilidad en el suelo y agua y su volatilización. Estos

aspectos son favorecidos por las propiedades físico- químicas como la presión de vapor, coeficiente de partición octanol-agua, coeficiente de absorción, solubilidad en el agua, entre otras. (IDEAM , 2019). La solubilidad en el agua de algunos plaguicidas los hace susceptibles a ser arrastrados por la lluvia, lo cual les permite contaminar fuentes de aguas superficiales y subterráneas donde se han encontrado meses después de su aplicación (IDEAM , 2019).

Actualmente no se cuenta con datos de contaminación hídrica causados por los vertimientos del sector agropecuario en Colombia que puedan determinar el impacto de esta actividad en los cuerpos de agua. Según el Estudio Nacional del Agua *"en el tema de calidad del agua, se recomienda mejorar la investigación en uso de agroquímicos en la agricultura (cantidad y ocupación), cargas contaminantes difusas y otras sustancias químicas que son vertidas a las corrientes Hídricas"*. (IDEAM , 2019)

Sin embargo, existen algunas investigaciones como la desarrollada para el sector cañero en el Valle del Cauca (Pérez , Peña , & Álvarez, 2011), donde se realizaron análisis al río Cauca a la altura de la Ciudad de Cali y se identificaron compuestos de agroquímicos tales como 2,4-D; Dinosebe; Dinoterbe, Fénuron; Pirimicarbe, Diuron y terbutryne, entre otros plaguicidas que pueden afectar la salud una vez se haga uso del agua para consumo y riego (reúso indirecto). Aunque en la zona de muestreo del estudio existen otro tipo de descargas, estos compuestos identificados tienen más relación con el uso de agroquímico que por otro tipo de vertimiento.

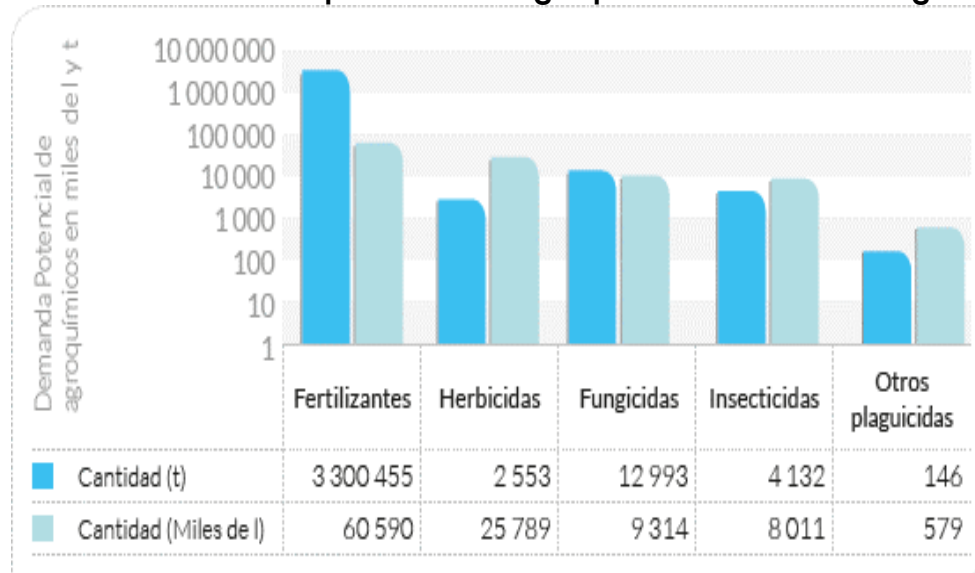
El estudio señala que *"la aplicación de aproximadamente 1.178 toneladas de pesticidas al año (para 2009) en el cultivo de caña de azúcar en la región, más el resto de pesticidas que se aplica a los otros cultivos, puede estar generando un riesgo potencial de tipo crónico y naturaleza química, ya que plausiblemente una fracción nada despreciable de esta carga terminará en los cauces de agua superficial y finalmente en el río Cauca"*.

Igualmente en un estudio realizado en la Ciénaga Grande del Valle Bajo del Río Sinú (Córdoba), para un área extensiva de cultivos de algodón, arroz, plátano y maíz se evaluó la contaminación por pesticidas organoclorados (Lans, Marrugo , & Díaz, 2018), donde se encontró presencia de α -BCH, β -BCH, γ -BCH, aldrin y heptacloro epóxido, en niveles por encima de la normatividad vigente, con graves implicaciones ambientales y para la salud, pues los moradores de la región dependen del ecosistema lagunar para su subsistencia.

Según el Estudio Nacional del Agua de 2018, la información de uso de agroquímicos para la agricultura en Colombia ha sido muy limitada, pero se ha

identificado una demanda potencial a nivel nacional. De acuerdo con las estadísticas de comercialización del Instituto Colombiano Agropecuario para el año 2016, la demanda de fertilizantes es de 3.300.455 toneladas en presentación sólida y de 60.590 litros en formulaciones líquidas (ICA, Comercialización de fertilizantes y acondicionador de suelos 2016, 2017). De igual manera, la demanda potencial nacional de plaguicidas (herbicidas, fungicidas, insecticidas y otros) es de 19.824 toneladas en presentación sólida y de 43.693 litros de formulaciones líquidas (ICA, 2017b). El Gráfico 124 muestra la demanda de agroquímicos en el sector agrícola.

Gráfico 124. Demanda potencial de agroquímicos en el sector agrícola



Fuente: Estudio Nacional del Agua, 2018

Según el Estudio Nacional del Agua, cuando un plaguicida es aplicado a un cultivo solo el 1% de este alcanza el organismo "blanco"¹⁴⁸, el 25% es retenido en el follaje, el 30% llega al suelo y el 44% es exportado a la atmósfera y a los sistemas acuáticos por escorrentía y lixiviación.

Bajo esa perspectiva, un gran porcentaje de los plaguicidas y fertilizantes aplicados son arrastrados a los cuerpos de agua, como contaminación difusa, lo cual afecta la calidad del recurso hídrico. El sector agropecuario realiza descargas directas incontroladas, incluidas las generadas por la escorrentía de las aguas lluvias que arrastra los excesos de químicos (fertilizantes y plaguicidas), rumen del ganado y sólidos suspendidos productos de la deforestación o mal uso de los terrenos.

¹⁴⁸ Organismo que se considera una plaga en los cultivos

Las circunstancias descritas anteriormente, sumadas a la baja capacidad e interés del sector para el control de sus vertimientos y la baja capacidad institucional de los organismos rectores y de control limita la implementación del reúso de manera efectiva. Actualmente se realizan descargas directas, incluidas las generadas por la escorrentía de las aguas lluvias que arrastra los excesos de químicos (fertilizantes y plaguicidas), rumen del ganado y sólidos suspendidos productos de la deforestación o mal uso de los terrenos dedicados a este sector.

Es necesario focalizar programas en los próximos años para el sector agrícola, considerando que es el que tiene mayores posibilidades en el país de implementar el reúso. Para ello, se requiere fortalecer los cuadros técnicos y directivos de los entes rectores del sector para avanzar en la tecnificación del agro y mejorar los indicadores de gestión y productividad en función del uso del agua, las tecnologías utilizadas, el control de sus vertimientos y la producción más limpia.

Igualmente es importante tener en cuenta que para el reúso agrícola se deben considerar los criterios que rigen su aplicación en cultivos y suelos que la FAO y los organismos nacionales del sector han establecido acerca el grado de la restricción de uso, por la salinidad (CE), la sodicidad (Combinación de RAS y CE), la toxicidad iónica específica y las concentraciones máximas de elementos trazas en aguas de riego, entre otros.

5.3.2. Recomendaciones normativas

5.3.2.1. Eliminación de la prohibición de cobro por el reúso de agua en beneficio del usuario generador

Es necesario reconsiderar el párrafo 1° del artículo 3 de la Resolución 1207 de 2014 y hacer las aclaraciones que sean necesarias a las demás normas aplicables para que sea posible el cobro por el suministro de agua tratada, con el fin de que se asimile más a lo que tradicionalmente se conoce como un mercado de agua en bloque para que el usuario generador cuente con instrumentos de repago de la inversión y un incentivo para el tratamiento con fines de reúso.

De acuerdo con el artículo 80 del Decreto-ley 2811 de 1974, "*las aguas son de dominio público, inalienables e imprescriptibles*". Sin embargo, esta norma no puede ser obstáculo para el reúso, pues el usuario generador no se hace propietario de las aguas: el cobro regulado por el agua tratada corresponde a los costos del tratamiento, no a un valor asignado al agua como recurso.

Tradicionalmente el tratamiento de aguas residuales y la normativa que regula la actividad en Latinoamérica y el Caribe es muy conservadora, por lo que hay necesidad de crear mecanismos innovadores de financiación para el

desarrollo de la actividad. Por otro lado, la falta de regulación de precio (o la prohibición) respecto de los subproductos del tratamiento de aguas residuales limitan la participación del sector privado por la imposibilidad de recuperar los costos de inversión (Banco Mundial, 2020).

Como se identificó en el Informe 2 de la consultoría, hay países donde se permite el cobro por el suministro de agua tratada. La razón tras esta medida es que, dentro de una lógica de mercado, los distintos actores eligen la alternativa que impacta de mejor manera su estructura de costos. Casos como los de San Luis Potosí, Cerro Verde, Durban y Nagpur son ejemplos de recuperación de costos de operación y mantenimiento mediante el cobro por el suministro de agua tratada a usuarios industriales.

Para el Banco Mundial, uno de los principales mecanismos para lograr el éxito de los sistemas de tratamiento de aguas residuales es permitir el cobro por el suministro de agua tratada, especialmente en lugares con escasez de agua. Adicionalmente, explica que el caso chileno es un fracaso en términos de alineación de incentivos porque los derechos sobre el agua no permiten la comercialización de agua tratada (Banco Mundial, 2020).

Si bien es cierto que con el reúso se reduce el pago de las tasas por vertimiento, esto no es suficiente para justificar económicamente que el usuario generador incurra en los costos para un tratamiento más avanzado y en la infraestructura que le permita transportar el agua tratada hasta el usuario receptor. Más que una actividad independiente que genere lucro para el generador debe constituirse como un mecanismo que, coordinado con los demás incentivos logre hacer atractivo económicamente el reúso para el usuario generador.

5.3.2.2. Analizar la modificación del requisito de concesión de aguas para reúso

La exigencia de concesión de aguas es un requisito complejo como consecuencia del trámite que debe agotarse, la información que se debe presentar y el tiempo para su evaluación y aprobación por parte de las autoridades ambientales competentes. En casos en que se requiere la modificación de licencia ambiental es especialmente complejo.

De acuerdo con el marco normativo vigente, no hay ninguna disposición que obligue a que el reúso deba tener el mismo trámite de la concesión de aguas tradicional. Es posible que el MADS lo haya hecho de esta manera para evitar la

creación de un procedimiento nuevo, pero la experiencia muestra que es importante hacerlo para garantizar la implementación del reúso.

En el ya mencionado estudio de la UTP para el MADS, se señala que *“Hay un reconocimiento por parte de los actores, sobre la responsabilidad de las AA en este tema. Las capacidades técnicas y operativas de las AA, son deficientes, alargando los procesos incluso a años, lo que sumado a la información que el usuario debe presentar, se desestimula la legalidad del reúso de aguas residuales tratadas. La demora en los trámites administrativos, específicamente en los casos donde hay licencia ambiental, convirtieron estos procesos en conflictos de larga duración.”* (UTP, 2016).

Por lo anterior, conviene revisar la posibilidad de reemplazar la concesión de aguas por otro instrumento como un permiso o un tipo especial de concesión de reúso para el que se pueda definir un procedimiento más simple tanto para el usuario como para las autoridades ambientales, que se limite a los componentes estrictamente necesarios para autorizar el reúso. Lo anterior, debido a que se trata de un supuesto muy diferente de la concesión de aguas tradicional, ya que en esta última sí hay captación de agua de una fuente superficial o subterránea y por ello afectación del recurso natural y el medio.

Sin importar el mecanismo seleccionado, las autoridades ambientales deben publicar a la mayor brevedad la información sobre el trámite, detallando todos los requisitos exigidos. Esta recomendación es clave porque pasados más de 5 años desde la Resolución 1207 de 2014 la información sobre reúso está altamente fragmentada y los portales oficiales de las autoridades ambientales no explican el trámite, como sí lo hacen con los demás permisos y autorizaciones.

5.3.2.3. Eliminación del pago de doble tasa por uso de agua

Debe especificarse a nivel normativo que la concesión para reúso no genera el pago de la tasa por el uso de agua, pues es un cobro que desnaturaliza la figura y que no responde a los motivos por los que existe la tasa, ya que no hay captación del medio natural.

Por otro lado, el vertimiento sigue siendo en principio del usuario receptor, quien no solo pagará tasa de uso por la obligación de contar con concesión de reúso sino también tasa retributiva por el vertimiento o en su defecto, los costos por la infraestructura y el proceso de tratamiento. Todo esto confluye y genera un escenario complejo donde no es atractivo para el usuario llevar a cabo reúso en los términos de la resolución.

Para la aplicación de esta modificación es necesario valorar dos alternativas:

- El ajuste del Capítulo 6 del Decreto 1076 de 2015 para introducir un rubro especial dedicado al reúso que reduzca sustancialmente la tasa a pagar resultado de la aplicación de la fórmula.
- La modificación del artículo 43 de la Ley 99 de 1993 y del Decreto-ley 2811 de 1974 para establecer una excepción al pago de tasa por concesión de aguas para la concesión de reúso.

Reiterando la posición del Banco Mundial respecto de la falta de alineación de incentivos en la región, no tiene sentido mantener estas cargas si el objetivo es fomentar el reúso de agua. Si bien la tasa recaudada tiene un fin ambiental importante, en la actualidad 1) no se recauda porque las concesiones de reúso son casi inexistentes en el país y 2) constituye una barrera más de entrada al reúso.

5.3.2.4. Aclaración de posibilidad de reusar cuando una empresa de servicios públicos suministra el agua potable

El Decreto 1076 de 2015 establece en su artículo 2.2.3.2.7.1 que toda persona natural o jurídica, pública o privada, requiere concesión para obtener el derecho al aprovechamiento de las aguas, pero para efectos del reúso debe entenderse que el usuario conectado a la red de acueducto está cobijado por la concesión de aguas con la que cuenta la empresa de servicios públicos a la que está suscrito.

Se requiere de este cambio de entendimiento porque la interpretación de la Resolución 1207 de 2014 da a entender que el usuario generador siempre debe contar con una concesión de aguas, pero la realidad del sector es que muchas personas -naturales y jurídicas- obtienen agua potable a través de una empresa de servicios públicos.

De esta manera se elimina la problemática sobre la interpretación de la norma y se abre el reúso a muchos usuarios urbanos y rurales que obtienen agua potable vía prestador de servicios públicos y que pueden contar con la infraestructura (o con la capacidad financiera suficiente) para llevar a cabo el tratamiento necesario del reúso.

Este mismo razonamiento debe aplicarse a aquellos usuarios que obtengan el agua para sus procesos productivos a través de carrotanques, validando que el proveedor sí cuente con la concesión para captar el recurso.

La modificación podrá realizarse vía resolución (o cualquier norma de mayor jerarquía) especificando que para efectos del reúso se acepta que el agua potable del usuario generador haya sido obtenida a través de una empresa prestadora del servicio público.

5.3.2.5. Aumento de las actividades en las que se permite el reúso

Las autoridades competentes deben trabajar para definir desde la perspectiva técnica más actividades en las que se pueda realizar reúso y las condiciones y parámetros en que este sea posible. La norma debe modificarse o complementarse con frecuencia para reflejar los avances en conocimiento de las autoridades, tecnología e intereses y capacidad de los sujetos que desarrollan diferentes actividades productivas.

Se requiere que las diferentes autoridades se interesen por el reúso para que sea posible definir actividades, trabajando en conjunto, por ejemplo, con el ICA para ampliar los usos agrícolas.

Como se mencionó en secciones anteriores, se recomienda incluir actividades como:

- Consumo directo de animales bovinos, porcinos y aves según parámetros adecuados para consumo definidos por la autoridad.
- Cuerpos de agua de uso recreativo.
- Riego de jardines no domiciliarios en suelo de usos no residenciales y en jardines y parques que hacen parte de la infraestructura y dotación de los municipios.
- Lavado de vehículos, fachadas y espacio público.
- Lavado y desinfección de áreas públicas.
- Apagado de coque.
- Humectación de arcillas.

De acuerdo con el Banco Mundial, la regulación en este aspecto limita el éxito de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, en algunos países de la región el reúso solo se permite para pocas actividades como la irrigación en condiciones muy restrictivas. Se necesita de regulación y parámetros claros para asegurar el uso de los subproductos y además para ampliar su potencial de mercado (Banco Mundial, 2020).

5.3.2.6. Parámetros del reúso en las normas aplicables

En línea con la ampliación de las actividades permitidas, es importante establecer los parámetros mínimos exigibles para el reúso. Es clave que las autoridades competentes comprendan que una regulación demasiado estricta impacta negativamente la posibilidad de implementación del reúso.

Como ejemplo de identificar un parámetro medurado y a la vez seguro, Perú indica en su regulación¹⁴⁹ que el criterio para evaluar la calidad del agua en reúso es el siguiente:

"Las solicitudes de autorización de reúso de aguas residuales tratadas serán evaluadas tomándose en cuenta los valores que establezca el sector correspondiente a la actividad a la cual se destinará el reúso del agua o, en su defecto, las guías correspondientes de la Organización Mundial de la Salud."

En opinión del experto internacional en temas de reúso, Julio Moscoso, la remisión peruana a los parámetros de la OMS es una decisión acertada. Establecer parámetros locales más estrictos y complejos pueden afectar la implementación del reúso y que pierda todo atractivo por los costos y esfuerzo adicional que habría que hacer.

En el momento, los parámetros exigidos en el país pueden considerarse como muy estrictos y generalizados, lo que impacta negativamente la implementación del reúso. En el citado caso de Bavaria S.A., la empresa indicó que *"Los requisitos técnicos establecidos actualmente en la resolución no permiten el cumplimiento de sus objetivos, sino que por el contrario, al ser tan estrictos para todas las actividades de reúso se desincentiva esta actividad"* y que debería valorarse la implementación de unos parámetros mínimos en línea con la Resolución 631 de 2015 o que cada sector sea quien determine los parámetros de calidad necesarios para cada actividad - como ocurre en Perú de acuerdo con la norma transcrita anteriormente - y supletoriamente el estándar que fijen las autoridades.

Además, las propias autoridades ambientales han observado las dificultades para su operatividad, por lo que la Corporación Autónoma de Cundinamarca en comunicaciones al MADS ha solicitado que se evalúe la pertinencia de ciertos parámetros como los niveles de presencia de Huevos de Helmintos, Parásitos Protozoos y Ésteres Ftalatos y que se considere las limitaciones prácticas como la falta de laboratorios autorizados para realizar análisis tan complejos como los que se exigen ahora.

¹⁴⁹ La norma citada corresponde al artículo 150 de la Reglamentación de la Ley 29338 de 2009.

En conclusión, la definición de parámetros debe ser un ejercicio consciente y medido para garantizar condiciones adecuadas pero que a la vez no se convierta en un desincentivo que imposibilite el reúso por sus altos costos. Dichos parámetros deben tener en cuenta el fin para el cual el agua va a ser usada.

5.3.2.7. Agua residual como fertilizante o acondicionador de suelos

Si la resolución expresamente excluye el reúso como fertilizante o acondicionador de suelos, se esperaba que se expidiera una nueva norma para regular este punto pues es uno de los usos para los que tradicionalmente se ha empleado el agua tratada (e incluso de manera generalizada agua sin tratar).

En la práctica, esta actividad se continúa realizando, aunque no existan parámetros. En consecuencia, debe preverse en la norma de reúso (o en su defecto en otra norma) los parámetros y características para desarrollar esta actividad en condiciones seguras para el ambiente y los seres humanos.

El estudio del Banco Mundial From Waste to Resource del año 2020 señala los efectos positivos del uso de agua tratada en agricultura¹⁵⁰: El uso de agua tratada parcialmente en agricultura ayuda a conservar y expandir las fuentes de agua disponibles y puede contribuir hacia un manejo más integrado de los recursos hídricos. Adicionalmente, los nutrientes (fósforo y nitrógeno) encontrados en el agua residual tratada puede ser muy valiosos para los agricultores. Dependiendo de la tecnología de tratamiento empleada, los niveles de fósforo y nitrógeno en el efluente de agua residual tratada puede ser muy alto. Estos elementos en el efluente pueden incrementar el rendimiento de los cultivos y su tamaño.

5.3.2.8. Componente de uso de aguas lluvias y reúso de agua no tratada

Es conveniente que se incorpore de manera explícita que, si parte del agua que se emplea en la actividad productiva proviene del almacenamiento propio o indirecto de aguas lluvias, lo cual no incorpora el componente de concesión, se pueda realizar su uso en los caudales equivalentes al agua lluvia empleada, sin que se considere un exceso sobre la cantidad autorizada en la concesión de aguas.

¹⁵⁰ "The use of partially treated wastewater in agriculture helps conserve and expand available water supplies and can contribute toward a more integrated management of water resources. Moreover, the nutrients (phosphorous and nitrogen) found in treated wastewater can be very valuable for farmers. Depending on the treatment technology employed, the levels of phosphorous and nitrogen in the treated wastewater effluent can be very high. These elements in the effluent can increase crop yield and size."

Esta aclaración apoya los propósitos de la política de economía circular y la eficiencia en el uso del recurso hídrico, además de dar seguridad jurídica al usuario ante eventuales procesos sancionatorios por un supuesto incumplimiento de los términos de la concesión.

5.3.2.9. Implementación de programas de incentivos

De acuerdo con las experiencias revisadas por el Banco Mundial, hay necesidad de nuevos mecanismos regulatorios en toda la Región de Latinoamérica y el Caribe que provea incentivos suficientes a los diferentes "stakeholders" para considerar el tratamiento de aguas residuales como sistemas para la recuperación de recursos dentro de un modelo de economía circular.

Por otro lado, según sus hallazgos, existen incentivos perversos (negativos) como el bajo precio por la extracción de agua de fuentes naturales que impactan la valoración adecuada de los recursos naturales y cualquier programa de reúso de agua y de recuperación de costos del tratamiento.

Para resolver las dificultades respecto del reúso se requiere entonces de incentivos positivos y de la eliminación de incentivos negativos como los mencionados anteriormente.

5.3.2.10. Programa de huella hídrica – Certificado Azul

Como mecanismo de implementación, es conveniente estudiar la creación de instrumentos asimilables al denominado "Certificado Azul" que existe en Perú, el cual hace parte de una estrategia de la Autoridad Nacional del Agua para la reducción voluntaria de la "huella hídrica" generada por las empresas. Para participar del programa las empresas deben: medir su huella hídrica, realizar un proyecto de reducción de huella hídrica y desarrollar un proyecto de valor compartido del agua. De acuerdo con la Resolución Jefatural N°104-2018-ANA, para obtener el certificado deben ejecutar con éxito los compromisos asumidos voluntariamente para la reducción.

El "Certificado Azul" no es solo un reconocimiento reputacional, pues en coordinación con otras entidades públicas se han emitido normas que le dan una aplicación práctica al otorgar puntaje adicional en procesos de contratación con el Estado peruano y como un requisito para acceder a participar en ferias internacionales de exportaciones, misiones comerciales y ruedas de negocio

realizadas por la Dirección de Promoción de Exportaciones de la Comisión de Promoción del Perú -PROMPERÚ.

5.3.2.11. Fortalecer el seguimiento en el uso del recurso agua

En línea con los hallazgos del Banco Mundial en Latinoamérica y el Caribe, es necesario fortalecer la capacidad de vigilancia y control de las autoridades para hacer seguimiento a las concesiones de agua, los permisos de vertimiento y el pago de las tasas ambientales respectivas. Adicionalmente, se necesita controlar de manera más estricta la captación de aguas superficiales o subterráneas y los vertimientos que carecen de concesión o permiso respectivamente.

Es importante resaltar que mientras no exista seguimiento adecuado, continuarán prácticas contrarias a las normas de vertimientos, lo que impacta directamente el interés en el reúso. Si la captación ilegal de agua (o por fuera de los límites permitidos en la concesión) o el vertimiento ilegal continúan sin miedo a consecuencias por la poca capacidad institucional del Estado, no hay interés en el reúso porque desde un primer momento no hay asignación de valor al recurso, no hay ahorro ni sanción porque la actividad continúa sin pagar ningún cargo o tasa por el recurso.

En consecuencia, se requiere de acciones estructurales sobre la administración del recurso para incrementar la legalidad en el acceso al agua y a través de esto, la afectación de todos los actores por los mismos incentivos positivos y negativos establecidos por la norma.

5.3.2.12. Incentivos y desincentivos a través de la regulación de tasas y tarifas

Independiente de las modificaciones futuras realizadas al marco jurídico aplicable al reúso, un principio básico que debe seguirse en todo momento es que el agua tratada para el mismo debe tener un precio inferior al del agua potable.

La principal realidad que internacionalmente ha fomentado el reúso es el estrés hídrico que incrementa o imposibilita la captación y acceso al agua en condiciones económicas que permitan el desarrollo de una actividad productiva. Para el caso colombiano, a pesar del incremento del estrés hídrico y el alto porcentaje de pérdida de agua, estos eventos no se están manifestando en las tasas y tarifas cobradas a los usuarios salvo en casos extremos de escasez del recurso.

La oferta estática (o en contracción) de agua acompañada de precios altos implica que los actores económicos deberán buscar alternativas que reduzcan los costos operativos del negocio, con lo cual el reúso se convierte en una solución atractiva a pesar de sus costos iniciales de implementación. Si la regulación impide la valoración adecuada del agua o no permite una diferenciación económica entre uso de agua potable y reúso, no se materializarán los incentivos suficientes para su implementación.

Por esta razón, es necesario generar, a través mecanismos de reglamentación y regulación, incentivos o medidas que generen una correlación adecuada entre la disponibilidad de agua potable, la tasa o tarifa que se cobra por el acceso al recurso que refleje adecuadamente el valor del agua y una fórmula para el agua tratada que la haga más atractiva económicamente que la captación o el suministro de agua cruda o agua potable.

5.3.3. Recomendaciones institucionales

5.3.3.1. Coordinación Institucional

En la medida que existen varios actores involucrados con la política de saneamiento y temas ambientales en Colombia, se presentan dificultades en la articulación entre las entidades del sector. Esta situación ocasiona que cada entidad adelante sus propias acciones respecto al tema de recurso hídrico, sin que exista un plan de acción único sectorial. Actualmente no existe una entidad o dependencia con la atribución de la toma de decisiones en relación con el manejo del agua y que involucre la intersectorialidad en sus usos.

Por lo tanto, resulta fundamental que exista una sola entidad que se encargue de administrar el tema de reúso de agua y tenga competencias para elaborar, tomar decisiones, administrar e impulsar esta política. En este sentido, consideramos que el reúso de agua podría encontrarse en cabeza del Consejo Nacional de Agua, o de un organismo descentralizado.

En el caso del Consejo Nacional del Agua, una de las funciones que le fueron asignadas es la coordinación y articulación entre las diferentes entidades que lo componen, teniendo como objetivo primordial la gestión del recurso hídrico, que incluye su uso eficiente y sostenibilidad, asuntos que están directamente relacionados con una política de reúso.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que es la entidad que hasta el momento se ha encargado del reúso, no solo participa del Consejo, sino que funge como su secretaría técnica. Así mismo en el Consejo participan la mayoría

de las entidades nacionales que tienen que ver con el tema de recurso hídrico con voto, y puede participar el IDEAM y personas naturales o jurídicas con voz y sin voto, lo cual otorga suficiente flexibilidad para discutir una política comprensiva y completa de reúso.

Para garantizar la eficacia y la obligatoriedad de las decisiones acordadas, hay que analizar el contenido del reglamento operativo adoptado por el propio Consejo y ajustarlo, de ser necesario, para que exista el compromiso de los distintos ministerios a tomar medidas eficaces, incluida la expedición de actos administrativos cuando a ello haya lugar.

La secretaría técnica del MADS y los comités técnicos¹⁵¹ deberán tener un papel activo en el seguimiento de las decisiones y en la convocatoria de las reuniones para evitar la inactividad del organismo. Hasta el momento, el Consejo ha sido poco activo pues no sesionó en el 2019 y se reactivó en febrero de 2020.

Adicionalmente, se recomienda crear un Consejo Consultivo para el tema específico en el tema de reúso conformado por delegados de los ministerios mencionados, el DNP, la academia, gremios (industriales, de servicios públicos, etc.), CARs, ICA, IDEAM, entre otros.

Este Consejo Consultivo tendría como función discutir y construir de forma conjunta, las bases y los planes de acción requeridos para materializar el reúso de Agua Residual Tratada en Colombia. De este modo, se concertarían las conveniencias (o no) de efectuar modificaciones a las disposiciones legales vigentes, así como de otras normas que actualmente puedan generar impedimentos en lograr masificar el reúso del agua. Posteriormente, la entidad encargada de administrar el reúso de agua, con base en los aportes de las otras entidades, desarrollará los planes y políticas tendientes a impulsar e incentivar esta actividad a nivel nacional.

Como se ha observado, uno de los principales destinos del agua para reúso es el sector agropecuario. Por lo tanto, consideramos importante que, al interior del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, exista una dirección dentro del Viceministerio de Asuntos Agropecuarios que se encargue del tema del recurso hídrico en este campo. Esta dirección, entre otros aspectos, podría ser responsable de fomentar las tecnologías de utilización del agua para riego, así como del correcto uso de fertilizantes y plaguicidas, rumen del ganado y sólidos suspendidos productos de la deforestación o mal uso de los terrenos dedicados a este sector,

151 Los comités técnicos son una figura creada para el Consejo en el artículo 2.2.8.3A.1.3. del Decreto 1076 de 2015, los cuales tienen el fin primordial de facilitar la operatividad del Consejo.

para minimizar el impacto de las descargas sobre los cuerpos de agua. En el Gráfico 125 se presenta la composición institucional propuesta.

Gráfico 125. Composición institucional reúso agua



Fuente: Consorcio N&V – Caltiz Aguas residuales.

5.3.3.2. Fortalecimiento de los sistemas de información y de las medidas de control

Actualmente el Sistema de Información de la SSPD recopila información relevante para el sector, sin embargo, se debe asegurar la disponibilidad de datos fiables que permitan conocer la eficiencia de los procesos de tratamiento de aguas residuales y la destinación de las mismas.

Así mismo, respecto las medidas de control, se requiere ser más eficientes en vigilar y controlar las concesiones de agua, los permisos de vertimiento, incluyendo el pago de las tasas ambientales respectivas. es necesario enfatizar y ser más exigentes en los mecanismos de control, inspección y vigilancia de manera integral sobre todos los aspectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales. De este modo, se generará el incentivo para hacer cumplir con las medidas que se

adopten en materia de descontaminación y reúso de agua. Esta actividad debe ser adelantada por parte de la SSPD dentro del marco de sus competencias.

5.3.4. Otras recomendaciones

Un aspecto importante para la sostenibilidad de un esquema de tratamiento de aguas residuales y de reúso de agua, consiste en su financiación. Por un lado, se deben contemplar las inversiones requeridas para el diseño y construcción de los STAR, por otro lado, es necesario garantizar la infraestructura para los distritos de riego de los cultivos que eventualmente serán objeto de reúso de agua.

En algunos casos, las inversiones en los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR), son financiadas por parte de las autoridades ambientales. Sin embargo, en otros casos, se deben buscar otras fuentes de financiación. Por tanto, en aquellos eventos donde no es posible su financiación por un tercero, los municipios pueden acudir a la oferta institucional del Gobierno Nacional para que sean financiados o cofinanciados por otras fuentes, la cuales se presentan en el Gráfico 126.

Gráfico 126. Fuentes de financiación o cofinanciación sector agua y saneamiento



Fuente: Consorcio N&V – Caltiz Aguas residuales.

Es preciso aclarar, que, de las fuentes de recursos mencionadas en el gráfico anterior, se requiere que los municipios verifiquen su participación en programas como el PDA o el PDET para determinar su disponibilidad de recursos en estos programas. Respecto a las otras fuentes, es necesaria la gestión del municipio a través de la formulación de proyectos.

En cuanto al PDET¹⁵², éste es un instrumento especial de planificación y gestión a 10 años. Su objetivo consiste en lograr la transformación estructural del campo y el ámbito rural, y un relacionamiento equitativo entre el campo y la ciudad, de manera que se asegure el bienestar y el buen vivir, la protección de la riqueza pluriétnica y multicultural, el desarrollo de la economía campesina y familiar, las formas propias de producción de las pueblos, comunidades y grupos étnicos, el desarrollo y la integración de las regiones abandonadas y golpeadas por el conflicto; el reconocimiento y la promoción de las organizaciones de las comunidades, incluyendo a las organizaciones de mujeres rurales y hacer del campo colombiano un escenario de reconciliación.

En relación con los recursos OCAD PAZ (el Órgano Colegiado de Administración y Decisión PAZ), de acuerdo con lo dispuesto en el Plan Nacional de Desarrollo - PND 2018-2022¹⁵³, mediante esta fuente se podrá garantizar la priorización de proyectos para mejorar los índices de cobertura de agua potable, saneamiento básico, entre otros proyectos.

Dentro de la financiación, otro aspecto que debe tenerse en cuenta para la sostenibilidad de un esquema de tratamiento de aguas residuales y reúso de agua se refiere a los costos de operación y mantenimiento tanto de los STAR, así como los de la infraestructura empleada para los distritos de riego.

Los costos de energía pueden constituir el mayor costo de operación de los sistemas. No obstante, en el PND 2018-2022, su artículo 280 modificó el literal h del artículo 11 de la Ley 1176 de 2007 y dispuso que dentro de los usos de los recursos del SGP, los municipios de categoría 5° y 6°, podrán adquirir los equipos requeridos y pago del servicio de energía por concepto de la operación de los sistemas de acueducto y alcantarillado, en los municipios que presten directamente estos servicios, conforme a la reglamentación que establezca el Gobierno nacional, siempre y cuando estos costos no estén incluidos en las tarifas cobradas a los usuarios.

Sin embargo, para municipios que no se encuentren ubicados dentro de la categoría 5° y 6°, los costos anteriores, así como el resto de los costos de operación

¹⁵² Decreto 893 de 2017

¹⁵³ Ley 1955 de 2019, Art.119.

y mantenimiento tanto de los STAR como de la infraestructura empleada para los distritos de riego, deben ser cubiertos con una fuente permanente de recursos que garantice su sostenibilidad a largo plazo

6. CONCLUSIONES

- Actualmente Colombia cuenta con más de 1028 instituciones que tienen algún grado de intervención en la administración y la gestión del agua, lo que dificulta la toma de decisiones sobre el recurso hídrico, pues no existe una sola entidad que se encargue de coordinar de manera integral el tema, específicamente en lo relacionado con el reúso de agua, lo cual genera una barrera para su implementación.
- Existe un vacío de información en cuanto al Tratamiento de Aguas Residuales en el país ya que los sistemas de información existentes no cuentan con reportes suficientes, actualizados y de calidad respecto a información de tratamiento de aguas, lo cual dificulta la toma de decisiones. Por lo tanto, es necesario mejorar los mecanismos de control, inspección y vigilancia a los operadores de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como a la eficiencia de los procesos.
- El sector agrícola hace uso de las aguas residuales sin algún tipo de tratamiento, principalmente en zonas rurales. Esto debido a que no cuentan con otra fuente de abastecimiento y les resulta más fácil y económico hacerlo.
- Actualmente, las aguas residuales son un insumo para las comunidades que hacen uso de ellas principalmente en actividades agrícolas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que para garantizar la implementación del reúso de manera segura se requiere contar con la participación de todos los actores involucrados dentro del proceso, los cuales deben comprender los beneficios, costos y riesgos de su uso.
- El país cuenta con experiencia en el uso de tecnologías para el tratamiento de agua residual. Si estos sistemas se operan de manera eficiente permitirían hacer el reúso directo del agua tratada con la calidad requerida. En otros casos, sería necesario adicionar módulos de tratamiento para obtener aguas tratadas que cumplan con los parámetros definidos dependiendo de su uso.
- Las aguas residuales tratadas, en especial de origen doméstico, tienen potencial para reusarse directamente en el sector agrícola. Mediante acuerdo entre el generador del vertimiento tratado y los propietarios de los cultivos se pueden crear mecanismos que permitan el reúso de esa fuente de agua

- En el marco legal actual que regula el reúso en Colombia (Resolución 1207 de 2014) se identificaron diferentes barreras que impiden la implementación del mismo en el país:
 - Lista limitada de actividades en que se autoriza el reúso.
 - Vacíos y la falta de claridad en la normativa que genera diferentes interpretaciones por parte de las distintas autoridades ambientales.
 - No se puede cobrar por el agua residual tratada entregada, lo que genera un desincentivo en su implementación, ya que se requiere una inversión para su transporte y tratamiento.
 - Se presenta un doble cobro de tasa por uso de agua ya que tanto generador como receptor están pagando por el agua captada de la fuente natural.
 - No existe una normatividad diferenciada en el país para el reúso y la recirculación. La Resolución 1207 de 2014 no establece distinción entre los dos conceptos.
 - La normatividad vigente no contempla la utilización de agua residual no tratada, la cual puede usarse en actividades específicas que estén autorizadas siempre y cuando cumpla con los estándares de calidad que se definan. La Resolución expresamente excluye el empleo de agua residual tratada como fertilizante o acondicionador de suelos.
- La utilización de aguas residuales tratadas para el riego de cultivos genera beneficios económicos a las campesinos y empresas agrícolas, ya que se disminuyen los costos de fertilizantes, los costos de extracción y distribución de agua dulce y ahorro en el pago de tasa por uso de agua.
- Es necesario investigar el uso de agroquímicos en la agricultura (cantidad y ocupación), cargas contaminantes difusas y otras sustancias químicas que son vertidas a las corrientes hídricas. Con esa información se podrían implementar programas y planes de acción que propendan por disminuir el impacto del sector sobre los cuerpos de agua y favorecer el reúso directo e indirecto del agua residual tratada.
- Los actores que intervienen en los casos de éxito documentados en el presente informe manifestaron su inconformismo con la normativa actual de reúso, ya que presenta muchos requisitos y trámites exigidos que consideran innecesarios y generan demoras en el proceso de implementación del reúso.
- Los casos documentados de reúso agrícola cumplen con los parámetros permisibles de la Resolución 1207 de 2014. En el caso de reúso industrial

documentado no se ha avanzado en la implementación del proyecto de reúso por diferentes inconvenientes identificados frente a la norma actual.

- Para la implementación del reúso industrial, el usuario que va a ser uso del vertimiento tratado debe ser quien defina la calidad requerida de acuerdo a sus necesidades. En todo caso, debe cumplir con la normatividad laboral, de salud y calidad que la autoridad competente tenga definida en cuanto a los procesos que harán parte del reúso, y de su posterior vertimiento a cuerpos de agua o al sistema de alcantarillado municipal.
- No se cuenta con información de casos de reúso doméstico, ya que en Colombia no se permite el reúso directo de agua residual tratada para consumo doméstico. Sin embargo, el reúso doméstico en la práctica se está realizando de manera indirecta, por la utilización de cuerpos de agua que están recibiendo continuamente descargas de aguas residuales domésticas e industriales.
- En cuanto a los aspectos técnicos recomendados para la implementación del reúso se recomienda:
 - Incrementar la construcción y optimización de los sistemas de tratamiento de aguas residuales existentes en Colombia.
 - Construir redes de alcantarillado separadas para sanitario y pluvial con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.
 - Incrementar el control a los vertimientos industriales sin tratamiento previo descargados a las redes municipales, ya que afectan los efluentes que llegan a los sistemas de tratamiento.
 - Mejorar la tecnología e infraestructura para el uso del agua en los distritos de riego y en la mayoría de los sistemas agrícolas.
- En cuanto a los aspectos normativos para la implementación del reúso se recomienda:
 - Eliminar la prohibición de cobro por el reúso de agua en beneficio del usuario generador.
 - Analizar una modificación al requisito de concesión de aguas para reúso que es un trámite complejo para su implementación.
 - Eliminar el pago de la doble tasa por uso de agua.
 - Realizar la aclaración en la normativa en cuanto a la posibilidad de hacer el reúso cuando una empresa de servicios públicos suministra el agua potable.
 - Aumentar las actividades en las que se permite hacer el reúso en la norma aplicable.

- Modificar los parámetros mínimos exigibles para el reúso, ya que actualmente son demasiado estrictos para su implementación.
 - Hacer explícitos los beneficios del agua residual como fertilizante o acondicionar de suelos.
 - Considerar en la normatividad el uso de aguas lluvias y reúso de agua tratada y no tratada (en casos específicos).
 - Implementar un programa de incentivos para que se aumente la aplicación del reúso en el país.
 - Fortalecer la capacidad de vigilancia y control de las autoridades para hacer seguimiento a las concesiones de agua, los permisos de vertimiento y el pago de las tasas ambientales respectivas.
- En cuanto a los aspectos institucionales para la implementación del reúso se recomienda:
 - Que exista una sola entidad encargada de administrar el tema de reúso de agua y tenga competencias para elaborar, tomar decisiones, administrar e impulsar esta política.
 - Crear un Consejo Consultivo conformado por delegados de los ministerios mencionados con el fin de discutir y construir de forma conjunta, las bases y los planes de acción requeridos para materializar el reúso
 - Fortalecer los sistemas de información y las medidas de control y vigilancia de las concesiones de agua, los permisos de vertimiento, incluyendo el pago de las tasas ambientales respectivas.
 - Así mismo es importante contemplar las inversiones requeridas para el diseño y construcción de los STAR con el fin de garantizar la infraestructura para los distritos de riego de los cultivos que eventualmente serán objeto de reúso de agua

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acciona Agua. (25 de Julio de 2018). *iAgua*. Obtenido de La EDAR de Atotonilco, la mayor planta de tratamiento de aguas residuales del mundo, cumple un año: <https://www.iagua.es/noticias/acciona-agua/edar-atotonilco-mayor-planta-tratamiento-aguas-residuales-mundo-cumple-ano>
- Almansa-Manrique, É., Velásquez-Penagos, J., & Rodríguez-Yzquierdo, G. (2018). Efecto del uso de aguas provenientes de la producción petrolera en actividades agrícolas y pecuarias. *Corpoica Ciencia Tecnologia Agropecuaria*, Mosquera (Colombia).
- ANA. (2018). *Guia Técnica para el Reuso Municipal de aguas residuales tratadas en el riego de areas verdes de Lima Metropolitana*. Lima : Autoridad Nacional del Agua - ANA.
- Anaya Garduño, M., Pérez Hernandez, A., Martínez Ponce, I., & López Hernández, N. (2018). *Sistemas de Captación del Agua de Lluvia (SCALL), Manual Técnico*. México : Colegio de Postgraduados.
- Aquino Espinoza, P. (2017). *Calidad de Agua en el Perú, Retos y aportes para una gestión sostenible en aguas residuales*. Lima, Peru : Derecho, Ambiente y Recursos Naturales (DAR).
- Arreguín Cortés, F., Moeller Chávez, G., Escalante Estrada, V., & Rivas Hernández, A. (1999). *El reúso del agua en México*. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,.
- Atienzar España, A. (5 de Febrero de 2020). Aspectos técnicos del proyecto de reúso de agua Atotonilco, Hidalgo. (Consorcio N&V - Caltiz Aguas residuales, Entrevistador)
- Averda . (15 de Junio de 2018). *Innovative wastewater treatment plant launched in Durban*. Obtenido de Averda Waste Management: <https://averda.co.za/news/innovative-wastewater-treatment-plant-launched-durban/>
- Ayers , R., & Wescott, D. (1985). *Water quiality for agriculture*. Roma: FAO Irrigation and drainage paper - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO.
- BID . (2015). *Agua y ciudades en América Latina: retos para el desarrollo sostenible*. Estados Unidos de América : Routhledge, Banco Interamericano de Desarrollo.
- Binnie, C., & Kimber, M. (2008). *Water Reuse, An international Survey of current practice issues and needs*. IWA Publishing.

- Buechler, S., Hertog, W., & Van Veenhuizen, R. (2003). El uso de aguas residuales en la agricultura Urbana. *Agricultura Urbana*, 1 - 51 pág.
- Carrasco Jiménez, J. (2016). *Técnicas de captación, acumulación y aprovechamiento de aguas lluvias*. Chile : INIA, Rayentué .
- CEPAL. (2000). *Informe Nacional del Perú sobre gestión de recursos hídricos*. Perú: Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL.
- Cohen, A., Mamane, H., & Lester, Y. (2015). *Reutilización de Aguas Residuales en México: Caso Sonora*. México: Water Research Center de la Universidad de Tel Aviv; Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
- Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. (2011). *Proyecto de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Hermosillo, Sonora*. México: Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza.
- Comisión Nacional de Agua. (2018). *Estadísticas del agua en México*. México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2017). *Situación del Tratamiento de Aguas Residuales Municipales en México*. México: SEMARNAT - Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2012). *Memoria Documental del Programa para la Modernización de Organismos operadores de Agua - PROMAGUA*. México: Comisión Nacional de Agua.
- CONAGUA. (2012). *Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco - Memoria Documental*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). *Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda*. México: Programa nacional para captación de agua de lluvia y Ecotecnias en zonas rurales (PROCAPTAR).
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Alternativas Tecnológicas de Tratamiento de Aguas Residuales Para la Recarga Artificial de Acuíferos*. México: Comisión Nacional del Agua.
- Cooperación Alemana para el Desarrollo. (2018). *Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México*. México: Secretaría de Energía (SENER), Dirección General de Energías Limpias, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Corresponsables. (4 de Diciembre de 2017). *Implementan en Zaragoza Amazonas planta de tratamiento de agua lluvia*. Obtenido de Corresponsables:

<https://colombia.corresponsables.com/actualidad/implementan-zaragoza-amazonas-planta-tratamiento-agua-lluvia>

- CTA. (2017). *Consultoría sobre productividad del uso del agua y la eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales y en el reúso del agua en Colombia. Misión de crecimiento Verde. DNP- Agencia Francesa de Desarrollo y Fondo Acción* . Antioquia: Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia CTA.
- DNP. (2018). *Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia*. Bogota: Departamento Nacional de Planeación.
- DNP. (2018). *Propuesta de ajuste normativo a la norma de reúso de agua vigente, con un enfoque de economía circular en el sector de agua potable*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación .
- DNP. (2020). *Borrador CONPES - Economía Circular en los servicios de Agua potable y Saneamiento*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.
- EPA, U. E. (2012). *Guidelines for Water Reuse*. Washington, D.C.: CDM Smith Inc. (CDM Smith); Cooperative Research and Development Agreement (CRADA) ; U.S. Environmental Protection Agency (EPA).
- Espiritu Limay, C. (S.f). *Aguas residuales domesticas de la planta de tratamiento de aguas residuales domestica (ptar) de Santa Clara para riego de cultivos en Lima*. Lima : Autoridad Nacional del Agua - Dirección de Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos.
- Estado de Israel . (2014). *Agua, La experiencia Israelí*. Israel : Israel NEWTech, Ministerio de Industria Comercio y Tabajo .
- FAO. (2008). *Country profile – Israel*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). AQUASTAT reports.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia - opciones técnicas para la agricultura familiar en américa latina y el caribe*. Chile: Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2013). *Captación y Almacenamiento de agua de Lluvia, Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y del Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA).
- FAO. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2015). *AQUASTAT Perfil de País - Chile*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- FAO. (2015). *AQUASTAT Perfil de País - Perú*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO. (2016). *Country profile – South Africa*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2017). *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile : Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Tomado de <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>.
- Fernández Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández , S., & Sanz García, J. (2003). *Tratamiento avanzados de aguas residuales industriales* . Madrid : Universidad de Alcála del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía.
- Fundación Chile. (2016). *Diagnóstico del potencial de reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso*. Chile: Fundación Chile - Gobierno Regional de Valparaíso.
- Fundación Chile. (2018). *Claves para la gestión de aguas residuales rurales, Primera Planta de Reúso de Aguas Tratadas en la Región de Coquimbo, una experiencia replicable*. Santiago de Chile: Proyecto financiado por el Gobierno Regional de Coquimbo a través del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC).
- FuturENVIRO. (2015). PTAR Atotonilco (Mexico D.F.). *FuturENVIRO - Proyectos, tecnología y actualidad medioambiental*, 16 Páginas.
- García-Salazar, E. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, Volumen 29, Número 54. Julio - Diciembre 2019*, 34 páginas.
- Gobierno Nacional . (2013). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025*. Chile: Ministerio de Obras Públicas.
- Guía Minera de Chile. (30 de Julio de 2018). *Compañía Contractual Minera Candelaria*. Obtenido de Guía Minera de Chile: <http://www.guiaminera.cl/compania-contractual-minera-candelaria/>
- Hutton, B., Kahan, I., Naidu, T., & Gunther, P. (2009). *Operating And Maintenance Experience At The Emalahleni Water Reclamation Plant*. Pretoria, South Africa: Document Transformation Technologies cc.
- ICA. (2017). *Comercialización de fertilizantes y acondicionador de suelos 2016*. Bogotá: Instituto colombiano Agropecuario (ICA). Dirección Técnica de Inocuidad de Insumos Agrícolas.

- ICA. (2017b). Estadísticas de comercialización de plaguicidas químicos de uso agrícola. Bogotá, Recuperado de https://www.ica.gov.co/áreas/agrícola/servicios/regulación-y-control-de-plaguicidas-químicos/estadísticas/cartilla-plaguicidas-2016_22-01-18.aspx: Instituto Colombiano Agropecuario. Dirección Técnica de Inocuidad de Insumos Agrícolas.
- IDEAM . (2019). *Estudio Nacional del Agua - ENA 2018*. Bogota : Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDESPO. (2011). *Componentes del SCALL*. Costa Rica: Universidad Nacional de Costa Rica.
- INEGI, I. N. (2015). *Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENAD)*. México.
- Lans, E., Marrugo , J., & Díaz, B. (2018). Estudio de la contaminación por pesticidas organoclorados en aguas de la Ciénaga Grande del Valle bajo del Río Sinú. *Universidad de Córdoba, Instituto Regional del Agua "IRAGUA" Grupo de Investigaciones en Agua Plaguicidas y Metales Pesados "GIAMP" Departamento de Química*, Tomado de https://www.researchgate.net/publication/28316662_Estudio_de_la_contaminacion_por_pesticidas_organoclorados_en_aguas_de_la_Cienaga_Grande_del_Valle_Bajo_del_Rio_Sinu.
- Mendoza, S. (2000). *Sistemas de Lagunas de Estabilización, Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío*. Mc. Graw Hill - Acodal.
- Merta, E. (11 de Marzo de 2019). *Planta de tratamiento de agua eMalahleni*. Obtenido de Mine Closure website: <https://mineclosure.gtk.fi/emalahleni-water-treatment-plant/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Reúso de Aguas residuales Tratadas. Estrategia para el Uso Eficiente y la Disminución de la Contaminación Del Recurso Hídrico*. Bogotá: Dirección de Gestión Integral de Recurso Hídrico.
- Observatorio de Agua . (2017). *Análisis Geoespacial de Canales de Riego en relación a las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) y Áreas Verdes en el ámbito de Lima Metropolitana* . Lima: Cooperación Alemana para el Desarrollo.
- OCWD, O. (2015). *Groundwater Replenishment System - GWRS*. Orange, California: Orange County Water District, OCWD).
- OEFA . (2014). *Fiscalización ambiental en aguas residuales*. Perú: Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA.
- Oficina de Información Diplomática. (2019). *Ficha de Pais - Estado de Israel*. España: Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.

- Oficina de Información Diplomática. (2019). *Ficha de País - Chile*. España: Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.
- Oficina de Información Diplomática. (2019). *Ficha de País - México*. España: Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.
- Oficina de Información Diplomática. (2019). *Ficha de País - Perú*. España: Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.
- Oficina de Información Diplomática. (2019). *Ficha de País - Sudáfrica*. España: Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación.
- Ojeda de la Cruz, A., Narváez Tijerina, A. B., & Quintana Pacheco, J. (2014). Gestión del agua doméstica urbana en Hermosillo (Sonora, México). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, Universidad Nacional de Colombia*, 147-164.
- Onyango, L., Leslie, G., & Wood, J. (2014). *Global Potable Reuse Case Study 3 : NEWater*. Singapore, Australian: University of New South Wales,.
- Orduz Aguilar, C. (2019). *Reúso de agua municipal en la industria petrolera, un caso de éxito de economía circular: TICSА Grupo EPM – COMAPA - PEMEX*. México: TICSА Grupo EPM.
- Paez Ruales, J. (2018). *Documento con Insumos técnicos para la optimización del marco normativo en materia de reúso del agua en Colombia*. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación - DNP.
- Peña, M. E., Ducci, J., & Plascencia, V. Z. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. México: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Pérez, M., Peña, M., & Álvarez, P. (2011). Agroindustria cañera y uso del agua: Análisis crítico en el contexto de la política de Agrocombustibles en Colombia. *Ambiente & Sociedades- Campinas V. XIV N.2. Tomado de <https://www.scielo.br/pdf/asoc/v14n2/11.pdf>*, 153-178.
- Pérez, C., Madera-Parra, C., Echeverri-Sanchez, A., & Urutia - Cobo, N. (2015). Wastewater Reuse: impact on the chemical and macronutritional attributes of an inceptisol irrigated with treated domestic wastewater. *Ingeniería y Competitividad, Volumen 17*, 19-28.
- Pérez, R., Jiménez, R., Jiménez, B., & Chávez, A. (S.f). ¿El agua del valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México? *Instituto de Ingeniería de la UNAM, Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria*, 9 páginas.
- Pizarro, R., Abarza, A., Morales, C., Calderón, R., Tapia, J., Garcia, P., & Córdova, M. (2015). *Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*. Chile: Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de

la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

- Polanía , C., & Tolorza , D. (2018). *Anteproyecto Evaluación del Potencial de Reúso de Aguas Residuales Tratadas en la Ptar del Cerrito para riego en cultivos de caña de azúcar*. Valle del Cauca: Universidad del Valle -Faculta de Ingeniería- Programa de Ingeniería agrícola.
- PortalFruticola. (17 de Agosto de 2017). *Como construir un sistema de captación y acumulacion de aguas lluvia para riego*. Obtenido de PortalFruticola: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2017/08/17/como-construir-un-sistema-de-captacion-y-acumulacion-de-aguas-lluvias-para-riego/>
- Poveda Lancheros; Sanabria Infante. (2017). *Evaluación de la eficiencia de cinco materiales de malla para el sistema de atrapanieblas en el Municipio de Siachoque – Departamento de Boyacá*. Siachoque: Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente CEAD - Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD.
- Quezada Neciosup, F. (S.f). *Tratamiento de Aguas Residuales en Lima y Callao*. Lima: Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima - Sedapal S.A.
- Quipuzco Ushñahua, L. E. (2004). Valoración de las aguas residuales en Israel como recurso agrícola: Consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú. *Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, Vol 7, N.º 13, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 64-72*.
- Quirós Vega, J. (2016). Los SCALL como sistemas domiciliarios alternos para el aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano. *Agua, cultura y territorio, Actas del I Congreso Internacional. Heredia, Costa Rica 2016* (págs. 32 - 46). Costa Rica: Patrimonio Cultural Iberoamericano.
- Rivas-Lucero, B., Nevárez-Moorillón, G., Raúl G. , B.-M., Pérez-Hernandez, A., & Saucedo-Terán, R. (2003). Tratamiento de aguas residuales de uso agrícola en un biorreactor de lecho fijo. *Agrociencia 37, 157-166*.
- Rodriguez, D., Serrano, H., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *From Waste to Resource: Shifting paradigms for smarter wastewater interventions in Latin America and the Caribbean*. Washington, DC.: World Bank.
- Rodriguez, J. (10 de 04 de 2018). *Tratamiento de aguas residuales: Elemento necesario en una economía circular*. Obtenido de Banco Mundial Blogs: <http://blogs.worldbank.org/es/voices/tratamiento-de-aguas-residuales-elemento-necesario-en-una-economia-circular>
- Rojas Gonzales, C. (Marzo de 2020). Sistema de tratamiento de aguas residuales Cerrito Valle. (E. Ojeda, Entrevistador)

- SEMARNAT. (2011). *Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Comisión Nacional de Agua.
- Silva, S. (1981). *On The treatment of domestic sewage in waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil*. PhD. Thesis, Dandee Univ. Escocia.
- SSPD. (2019). *Estudio Sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018*. Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios .
- Suarez , C. (2010). *Tratamiento de Aguas residuales Municipales en el Valle del Cauca*. Cauca: Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería. Universidad del Valle .
- Suárez, J. A., García, M. Á., & Mosquera, R. O. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia . VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água João Pessoa (Brasil), 12.
- Torreblanca Marmanillo, J. (2016). *Cerro Verde y su Gestión Sostenible del Agua*. Arequipa, Perú: Interclima 2016.
- Toxopeüs , M. (9 de February de 2019). *The state of sanitation and wastewater treatment services in South Africa*. Obtenido de The Helen Suzman Foundation: <https://hsf.org.za/publications/hsf-briefs/the-state-of-sanitation-and-wastewater-treatment-services-in-south-africa>
- Trochez Balcázar. (2017). *Evaluación Del Potencial Uso Para Riego Del Efluente De La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales De Ginebra Valle Del Cauca*. Valle del Cauca : Universidad del Valle- Cinara, Tesis título Ingeniería Agrícola.
- Tróchez, J. (2017). *Evaluación del potencial uso para riego del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ginebra Valle del Cauca*. Cali: Universidad del Valle.
- Univalle. (2019). *Estrategias para la recuperación y manejo integrado del recurso hídrico en las cuencas del Cauca y Dagua en el Valle del Cauca*. Valle del Cauca : Universidad del Valle para el Fondo Nacional de Regalías.
- Valverde, J. (2018). *Caso Cerro Verde – Arequipa – Perú. Un Proyecto Ganar – Ganar. PTAR La Enlozada – Recuperación de un río - Reúso de agua*. Buenos Aires: TALLER: Agua Residual - De desecho a recurso. Cambiando paradigma.
- VEOLIA. (2 de 16 de 2006). *Veolia Water pone en marcha la mayor desaladora del mundo*. Obtenido de Veolia : <http://www.veoliawatertechnologies.es/news/Prensa/2006-02-16,6320.htm>

- Vivir Hogar . (19 de Octubre de 2009). Obtenido de Cambiar o reemplazar canaletas de la casa: <http://vivirhogar.republica.com/hagalo-ud-mismo/cambiar-o-reemplazar-canaletas-de-la-casa.html>
- Water Scarcity Solutions. (2016). *Effluent treatment and aquifer storage for agricultural use, Dan Region, Israel*. Israel: Water Scarcity Solutions.
- WHO, S. G. (1989). *Health Guidelines for the use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*. Ginebra: World Health Organization.
- Wilder, M., Scott, C. A., Pineda-Pablos, N., Varady, R. G., & Garfin, G. M. (2012). Capítulo 5: Hermosillo. En M. Wilder, C. A. Scott, N. Pineda-Pablos, R. G. Varady, & G. M. Garfin, *Avanzando desde la Vulnerabilidad hacia la Adaptación: El Cambio Climático, la Sequía, y la Demanda del Agua en Áreas Urbanas del Suroeste de los EEUU y el Norte de México* - (pág. 48). Tucson: Udall Center for Studies in Public Policy, The University of Arizona.
- Word Bank Group. (2018). *Wastewater: From Waste to Resource, The Case of Durban, South Africa*. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- WWAP. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017, Aguas residuales: El recursos desaprovechado*. París: UNESCO.
- WWAP. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Paris : Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.