



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD  
CAMPO DE CONOCIMIENTO: RESTAURACIÓN AMBIENTAL

FACTORES SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES RELACIONADOS CON EL  
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL A TRAVÉS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
HUMEDALES ARTIFICIALES ACOPLADOS A UN SISTEMA DE LODOS  
ACTIVADOS

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:

**JUANA MARTÍNEZ MACEDO**

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO**  
FACULTAD DE QUÍMICA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ

CONACYT-UAM

M. EN D. U. LORETA CASTRO REGUERA MANCERA

FACULTAD DE ARQUITECTURA

DRA. LETICIA MERINO PÉREZ

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOCIALES

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

NOVIEMBRE 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

Coordinación de Estudios de Posgrado  
Ciencias de la Sostenibilidad  
Oficio: CEP/PCS/312/17  
Asunto: Asignación de Jurado

Lic. Ivonne Ramírez Wence  
Directora General de Administración Escolar  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su vigésimo sexta sesión del 27 de junio del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **MARTÍNEZ MACEDO JUANA** con número de cuenta **410005444** con la tesis titulada "Factores socioeconómicos y ambientales relacionados con el tratamiento de agua residual a través de la implementación de humedales artificiales acoplado a un sistema de lodos activados", bajo la dirección del Dr. Víctor Manuel Luna Pabello.

|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| PRESIDENTE: | DRA. ALMA CHÁVEZ MEJÍA               |
| VOCAL:      | DR. ARSENIO GONZÁLEZ REYNOSO         |
| SECRETARIO: | DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ |
| SUPLENTE 1: | MTRA. LORETA CASTRO REGUERA          |
| SUPLENTE 2: | DR. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO       |

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 11 de octubre de 2017.

  
Dra. Marisa Mazari Hiriart  
Coordinadora del Programa de  
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad

## **Agradecimientos institucionales**

Agradezco al Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) por la autorización para utilizar la información generada en el proyecto: *Estudio técnico multidisciplinario para la implementación de un sistema de humedales artificiales para saneamiento del aporte del Río Amanalco a la presa Valle de Bravo*, ya que fue muy valioso para la conclusión de este trabajo de tesis.

También agradezco a la maestra Lucía Madrid, representante del Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (CCMSS) por su invaluable apoyo en la gestión de las entrevistas que realicé en el municipio de Amanalco y sobre las cuales mi trabajo se basa.

De igual forma, agradezco el apoyo brindado por los miembros del Grupo Académico Interdisciplinario Ambiental (GAIA) por el apoyo brindado durante la realización de la presente investigación.

Con especial agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme realizar otra etapa profesional más, en sus filas.

Gracias a los miembros del comité tutor: Dr. Daniel Revollo Fernández, Dra. Leticia Merino Pérez, M. en D. U. Loreta Castro Reguera y por supuesto al Dr. Víctor Luna Pabello, asesor principal de la tesis.

Gracias a los miembros del jurado: Dra. Alma Chávez Mejía y Dr. Arsenio González Reynoso.

## **Agradecimientos personales**

Quiero agradecer a mis padres, Ebelia y Encarnación, porque a pesar de nuestras diferencias y desacuerdos me apoyaron para culminar otra etapa profesional más en mi vida.

A Erika, quien es parte de mí misma y en este ciclo que se cierra, no podía faltar su apoyo, explicaciones de las teorías sociales que me parecían tan complejas y sobre todo su complicidad, no tengo palabras para agradecerle y expresarle mi amor. Gracias por estar siempre.

A Nayibe y Beto, mis sobrinos-hijos, de ustedes he aprendido a reinventarme, a tener perspectivas de la vida que ya había perdido y que, gracias a ustedes, con sus ocurrentes preguntas e increíbles explicaciones he podido volver a ver e imaginar un mundo diferente. Es por ustedes por quienes trabajo día a día, porque merecen vivir en un planeta como el que conocí en mi niñez. Ustedes son la generación del presente y quienes continuarán luchando porque exista la esperanza de un futuro.

A Alfredo, a pesar de la adversidad confío en que seremos capaces de vencer los obstáculos de la vida.

A mamá Juanita y papá Alfredo por su apoyo en cada etapa, por todas las historias que completan mi vida.

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello, por brindarme su apoyo y asesoría en el curso del presente trabajo.

A la Dra. Leticia Merino Pérez, por su invaluable e inmenso apoyo en la realización del trabajo de campo, por sus valiosos consejos académicos y brindarme alojamiento en su casa: muchas gracias Lety, no me alcanzan las palabras para expresarle mi más profundo y sincero agradecimiento, eres un increíble ser humano.

Al Dr. Daniel Revollo Fernández por sus valiosos consejos al presente trabajo y el conocimiento recibido en la clase de valoración económica.

Gracias a los valiosos comentarios de la Dra. Alma Chávez, que han enriquecido mucho este trabajo.

Con especial agradecimiento al Dr. Arsenio González Reynoso por aceptar formar parte del jurado y leer la presente investigación.

Quiero agradecer a todos los profesores que me impartieron clase en el posgrado, en especial al maestro Vicente Arriaga, quien hizo posible que el curso de Restauración ambiental tuviera una amplia riqueza de conocimiento y experiencia por parte de diversos profesionistas, así como por brindarnos valiosas experiencias de trabajo en el área de la restauración ambiental y mostrarnos que es posible revertir y cambiar el curso del manejo de los recursos naturales e impactar positivamente en el ambiente y la sociedad.

Quiero agradecer al maestro Francisco González Medrano, por compartirnos su experiencia de vida en campo y mostrarnos la riqueza de la flora del país. Gracias por mostrarme su amor por la vida hasta el último momento.

Por supuesto, no puede faltar mi agradecimiento a los compañeros del laboratorio de microbiología ambiental de la Facultad de Química: Luis, Jorge, Alejandra, Erick, Manu, Sergio y Rafa. Gracias por su conocimiento y explicaciones del fenómeno de eutrofización y por todos los buenos momentos que ahí vivimos.

Gracias a la paciencia de Osvaldo y Fer César, por brindarme su amistad y apoyo.

Gracias a todos los miembros de GAIA: Moni, Alfred, Fer, Ime, Angie, Luz, Yanín, Sil, Ernest, al ingeniero José Antonio Poncelis, Jorge Compeán y todos los integrantes: gracias por su apoyo invaluable.

Finalmente, gracias a todas las personas que han hecho posible el Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, una opción interdisciplinaria que me ha brindado la oportunidad de analizar el mundo desde otros ángulos y visiones y en el cual he conocido personas maravillosas e increíbles amigos.

---

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LISTADO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>GLOSARIO .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>RESUMEN .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>I INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>15</b> |
| <b>I.1 Objetivos .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>I.2 Hipótesis.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>I.3 Descripción del área de estudio.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>II MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES .....</b>   | <b>27</b> |
| <b>II.1 Marco de administración y transición (MTF).....</b>  | <b>29</b> |
| <b>II.2 Los recursos hídricos: perspectiva actual y futura .....</b>   | <b>33</b> |
| <b>II.3 El tratamiento del agua en el marco del desarrollo sostenible .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>II.3.1 El derecho a un medio ambiente sano y un futuro sostenible .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>II.3.2 El tratamiento del agua en el país.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>II.4 Aspectos técnicos del tratamiento de agua .....</b>  | <b>42</b> |
| <b>II.4.1 Plantas de tratamiento de lodos activados .....</b>  | <b>48</b> |
| <b>II.4.2 Los humedales artificiales: ecotecnología de tratamiento de agua .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>II.5 Eutroficación de los cuerpos de agua .....</b>   | <b>58</b> |
| <b>II.5.1 Propuestas para enfrentar la eutroficación de cuerpos de agua .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>II.6 Factibilidad de utilización de humedales artificiales con otras tecnologías y opción viable ante la eutroficación.....</b> | <b>62</b> |
| <b>III DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>III.1 Métodos de investigación social.....</b>  | <b>65</b> |
| <b>III.2 Propuesta conceptual de implementación de la PLA-HA .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>III.3 Método de valoración económica Análisis Costo-Beneficio .....</b>   | <b>71</b> |
| <b>IV RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN: EL CASO DE LA PLA AMANALCO .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>IV.1 Aspectos socioeconómicos y ambientales.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>IV.1.1 Sistema socioeconómico.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>IV.1.2 Sistema ambiental .....</b>  | <b>86</b> |

---

|   |            |
|---|------------|
| <b>IV.2 Resultados de la propuesta conceptual de implementación de la PLA-HA</b>  | <b>89</b>  |
| <b>IV.3 Análisis costo-beneficio.....</b>   | <b>93</b>  |
| <b>IV.3.1 Costos de inversión .....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>IV.3.2 Costos de operación y mantenimiento.....</b>  | <b>95</b>  |
| <b>IV.3.3 Beneficios .....</b>  | <b>96</b>  |
| <b>IV.3.4 Resultados integrados del ACB .....</b>   | <b>102</b> |
| <b>IV.4 Discusión de resultados .....</b>   | <b>103</b> |
| <b>V CONCLUSIONES.....</b>  | <b>108</b> |
| <b>VI RECOMENDACIONES .....</b>   | <b>111</b> |
| <b>VII REFERENCIAS.....</b>   | <b>112</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>124</b> |
| <b>Anexo 1. Selección estudio caso utilizando el Análisis Jerárquico Multicriterio (Analysis Hierarchy Multicriterio , AHP) .....</b> | <b>124</b> |
| <b>Anexo 2. Parámetros de cumplimiento en la descarga de agua a cuerpos nacionales.....</b>   | <b>128</b> |
| <b>Anexo 3. Entrevista semi-estructurada.....</b>   | <b>130</b> |
| <b>Anexo 4. Resultados extendidos ACB .....</b>   | <b>134</b> |

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.- Componentes de cada regla .....  | 32 |
| Tabla 2.- PTAR en operación por RHA .....  | 40 |
| Tabla 3.- Valores de contaminantes en agua residual municipal .....  | 43 |
| Tabla 4.- Niveles de tratamiento del agua residual .....   | 43 |
| Tabla 5.- Procesos unitarios típicamente utilizados según el contaminante a remover del agua residual.....                               | 44 |
| Tabla 6.- Parámetros físicos del agua residual .....   | 45 |
| Tabla 7.- Características químicas inorgánicas.....  | 46 |
| Tabla 8.- Características químicas orgánicas.....  | 47 |
| Tabla 9.- Características biológicas .....   | 47 |
| Tabla 10.- Normas oficiales mexicanas relacionadas con el tratamiento de agua en el país.....  | 48 |
| Tabla 11.- Clasificación de los niveles tróficos de los lagos de acuerdo con variables que pueden ser medidas en los mismos .....        | 59 |
| Tabla 12.- Descripción de la metodología de acuerdo con el carácter de las preguntas de investigación.....                               | 63 |
| Tabla 13.- Actores entrevistados.....  | 65 |
| Tabla 14.- Categorías de organización de los datos obtenidos.....  | 66 |
| Tabla 15.- Valores de referencia de remoción de contaminantes, según los parámetros que se utilizan para diseño de las tecnologías ..... | 67 |
| Tabla 16.- Municipios que componen la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco .....   | 76 |
| Tabla 17.- Resultados del muestreo realizado por OCAVM al cauce del río Amanalco .....   | 91 |
| Tabla 18.- Escenario 1. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de la PLA .....  | 92 |
| Tabla 19.- Escenario 2. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de la combinación PLA-HA .....                                 | 92 |
| Tabla 20.- Escenario 3. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de los HA .....  | 92 |
| Tabla 21.- INPP de los años requeridos para la actualización de costos.....  | 94 |
| Tabla 22.- Costos de inversión (escenario 1).....  | 95 |
| Tabla 23.- Costo de inversión para la instalación de humedales artificiales (escenario 3) .....  | 95 |
| Tabla 24.- Costo de inversión para combinación la PLA-HA (escenario 2).....  | 95 |
| Tabla 25.- Costos de operación de la PLA.....  | 96 |
| Tabla 26.- Costos de mantenimiento de la PLA .....   | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 27.- Operación y mantenimiento de los HA .....  | 96  |
| Tabla 28.- Costos de operación y mantenimiento de cada escenario .....  | 96  |
| Tabla 29.- INPC de los años requeridos para la actualización de costos.....   | 97  |
| Tabla 30.- Derrama económica en el municipio debido al turismo .....  | 97  |
| Tabla 31.- Actualización de la derrama económica hacia el 2017.....   | 98  |
| Tabla 32.- Pérdida económica extrapolada del año 2012 y actualización hacia el 2014 y 2017.....                               | 98  |
| Tabla 33.- Valores de los caudales y oxígeno disuelto en el río Amanalco en un año .....                                      | 100 |
| Tabla 34.- Valor de los indicadores de remoción de fósforo .....  | 100 |
| Tabla 35.- Valores reportados de los beneficios de algunos servicios ambientales que proveen los HA.....                      | 101 |
| Tabla 36.- Valor del servicio ambiental considerado para la valoración de beneficios proporcionados por HA en la cuenca ..... | 102 |
| Tabla 37.- Tabla resumen resultados ACB .....   | 102 |
| Tabla 38.- Tabla resumen resultados ACB sin considerar el valor de los servicios ambientales .....                            | 102 |
| Tabla 39.- Alternativas de los casos de estudio .....   | 124 |
| Tabla 40.- Criterios para seleccionar el caso de estudio y su descripción .....   | 125 |
| Tabla 41.- Transformación cualitativa a valores cuantitativos .....   | 125 |
| Tabla 42.- Matriz de comparaciones pareadas de los criterios de evaluación ....   | 125 |
| Tabla 43.- Comparaciones normalizadas y peso ponderado de cada criterio.....  | 126 |
| Tabla 44.- Subcriterios de evaluación del criterio 1 .....  | 126 |
| Tabla 45.- Subcriterios de evaluación del criterio 2.....   | 126 |
| Tabla 46.- Subcriterios de evaluación del criterio 3.....   | 127 |
| Tabla 47.- Resultados de la evaluación AHP .....  | 127 |
| Tabla 48.- Límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 .....   | 128 |
| Tabla 49.- Resultados ACB del escenario 1 (valores máximos).....  | 134 |
| Tabla 50.- Resultados ACB del escenario 2 (valores máximos).....  | 135 |
| Tabla 51.- Resultados ACB del escenario 3 (valores máximos).....  | 136 |
| Tabla 52.- Resultados ACB del escenario 1 (valores mínimos) .....   | 137 |
| Tabla 53.- Resultados ACB del escenario 2 (valores mínimos) .....   | 138 |
| Tabla 54.- Resultados ACB del escenario 3 (valores mínimos) .....   | 139 |
| Tabla 55.- Resultados ACB del escenario 1 (valores máximos sin servicios ambientales).....                                    | 140 |
| Tabla 56.- Resultados ACB del escenario 2 (valores máximos sin servicios ambientales).....                                    | 141 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 57.- Resultados ACB del escenario 3 (valores máximos sin servicios ambientales)..... | 142 |
| Tabla 58.- Resultados ACB del escenario 1 (valores mínimos sin servicios ambientales)..... | 143 |
| Tabla 59.- Resultados ACB del escenario 2 (valores mínimos sin servicios ambientales)..... | 144 |
| Tabla 60.- Resultados ACB del escenario 3 (valores mínimos sin servicios ambientales)..... | 145 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.- Cuenca del área de estudio .....   | 18 |
| Figura 2.- Esquema del Sistema Cutzamala .....  | 19 |
| Figura 3.- Perfil de altura del Sistema Cutzamala .....   | 20 |
| Figura 4.- PTAR en la cuenca .....  | 23 |
| Figura 5.- Infraestructura de tratamiento en la zona de estudio .....                                   | 25 |
| Figura 6.- Área de estudio (municipio de Amanalco de Becerra) .....                                     | 26 |
| Figura 7.- Áreas potenciales para la instalación de Humedales artificiales .....                        | 26 |
| Figura 8.- Sistema socio-ambiental del caso de estudio .....  | 28 |
| Figura 9.- Esquema del marco de Análisis y Desarrollo Institucional .....                               | 29 |
| Figura 10.- Diagrama del marco teórico de administración y transición (MTF) ....                        | 30 |
| Figura 11.- Usos de los recursos hídricos en México .....   | 34 |
| Figura 12.- Grado de presión hídrica por Región Hidrológica Administrativa (RHA) .....                  | 35 |
| Figura 13.- Agua residual tratada y no tratada .....  | 40 |
| Figura 14.- Procesos de tratamiento de las PTAR .....   | 41 |
| Figura 15.- Origen de los recursos financieros para la instalación de PTAR .....                        | 42 |
| Figura 16.- Tren de tratamiento según calidad requerida del efluente .....                              | 47 |
| Figura 17.- Proceso de lodos activados (mezclado completo) .....  | 49 |
| Figura 18.- Esquema de un humedal artificial (HA).....  | 51 |
| Figura 19.- Principales procesos efectuados por los HA para la remoción de contaminantes del agua ..... | 51 |
| Figura 20.- Clasificación de los HA .....   | 52 |
| Figura 21.- Composición del VET.....  | 56 |
| Figura 22.- Valor económico total (VET) de la construcción de humedales artificiales .....              | 57 |

Figura 23.- Diagrama de procesos que controlan el ciclo y la retención de nutrientes en un embalse..... 60

Figura 24.- Diagrama del diseño metodológico de la investigación..... 64

Figura 25.- Conceptualización del funcionamiento PLA-HA..... 68

Figura 26.- Diagrama de Flujo de Proceso de la PLA ..... 69

Figura 27.- Diagrama de Flujo de Proceso de la combinación PLA-HA..... 70

Figura 28.- Salida de agua de la PLA hacia el río (visita 22 de noviembre de 2016) ..... 75

Figura 29.- Salida de agua de la PLA hacia el río (visita 03 de febrero de 2017) . 75

Figura 30.- Mapa base del municipio de Amanalco..... 78

Figura 31.- Mapa base del municipio de Valle de Bravo ..... 79

Figura 32.- Actores en la cuenca Valle de Bravo-Amanalco ..... 82

Figura 33.- Cauce del río Amanalco..... 87

Figura 34.- Sistema ambiental actual y principales servicios de los recursos hídricos ..... 88

Figura 35.- Procesos que contribuyen al estado trófico de la Presa ..... 89

Figura 36.- Análisis del caso de estudio de acuerdo con el MTF ..... 104

---

**LISTADO DE ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS**

|                   |   |
|-------------------|---|
| ACB               | Análisis Costo-Beneficio  |
| AHP               | Análisis Jerárquico Multicriterio   |
| AID               | Marco de Análisis Institucional y Desarrollo                              |
| ANP               | Área Natural Protegida  |
| APAS              | Organismo operador de agua potable  |
| BID               | Banco Interamericano de Desarrollo  |
| CAEM              | Comisión del Agua del Estado de México                                    |
| CCMSS             | Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible AC                 |
| CCVBA             | Comisión de cuenca Valle de Bravo-Amanalco                                |
| CCVM              | Consejo de Cuenca Aguas del Valle de México                               |
| CECCA             | Criterios Ecológicos de Calidad del Agua                                  |
| CETES             | Certificados de la tesorería  |
| Cl <sup>-</sup>   | Cloruros  |
| CO <sub>2</sub>   | Dióxido de carbono  |
| CONAGUA           | Comisión Nacional de Agua   |
| COT               | Carbono orgánico total  |
| DBO <sub>5</sub>  | Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días                                    |
| DOF               | Diario Oficial de la Federación   |
| DQO               | Demanda química de oxígeno  |
| DTP               | Distribución de tamaño de partícula                                       |
| FAO               | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura |
| HA                | Humedales artificiales  |
| HAFS              | Humedales artificiales de flujo superficial                               |
| HAFSS             | Humedales artificiales de flujo subsuperficial                            |
| INEGI             | Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática                |
| INPC              | Índice Nacional de Precios al Consumidor                                  |
| INPP              | Índice Nacional de Precios al Productor                                   |
| Inorg P           | Fósforo inorgánico  |
| IVT               | Indicador de valoración de cada tecnología                                |
| LAN               | Ley de aguas nacionales   |
| LFD               | Ley Federal de Derechos   |
| LGEEPA            | Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente          |
| LMP               | Límites Máximos Permisibles   |
| LPS               | Litros por segundo  |
| m <sup>3</sup> /s | Metros cúbicos por segundo  |
| MEA               | Evaluación de Ecosistemas del Milenio                                     |
| msmn              | Metros sobre el nivel del mar   |
| MTF               | Marco de administración y transición                                      |
| N                 | Nitrógeno   |

---

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| NT                            | Nitrógeno Total   |
| NH <sub>3</sub>               | Amoniac   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | Ion amonio  |
| NMP                           | Número más probable de colonias   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | Nitritos  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | Nitratos  |
| NOM                           | Norma Oficial Mexicana  |
| OCAVM                         | Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México   |
| ODAPAS                        | Organismo descentralizado de agua potable, alcantarillado y saneamiento                               |
| ONU                           | Organización de las Naciones Unidas   |
| Org N                         | Nitrógeno orgánico  |
| Org P                         | Fósforo orgánico  |
| P                             | Fósforo   |
| PT                            | Fósforo total   |
| pH                            | Potencial de hidrógeno  |
| PM                            | Promedio mensual  |
| PO <sub>3</sub> <sup>4-</sup> | Ortofosfatos  |
| PLA                           | Planta de tratamiento a partir de lodos activados   |
| PROSSAPYS                     | Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales |
| PTAR                          | Planta de tratamiento de aguas residuales   |
| RHA                           | Región Hidrológica Administrativa   |
| SAIMEX                        | Sistema de Acceso a la Información Mexiquense   |
| SDT                           | Sólidos disueltos totales   |
| SECTUR                        | Secretaría de Turismo   |
| SEDESOL                       | Secretaría de Desarrollo Social   |
| s.f.                          | Sin fecha   |
| SEMARNAT                      | Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Sulfatos  |
| SS                            | Sólidos sedimentables   |
| SST                           | Sólidos sedimentables totales   |
| SSV                           | Sólidos suspendidos volátiles   |
| ST                            | Sólidos totales   |
| SVT                           | Sólidos volátiles totales   |
| TIR                           | Tasa interna de retorno   |
| TP                            | Tamaño de partícula   |
| VAN                           | Valor Actual Neto   |
| VET                           | Valor Económico Total   |
| VNU                           | Valor de no uso   |
| VU                            | Valor de uso  |

## GLOSARIO

**Agua residual:** Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción VI).

**Agua residual municipal:** Agua residual que es manejada en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, proveniente de las descargas de uso público urbano, doméstico, comercial y de servicios (CONAGUA; 2016a).

**Análisis costo-beneficio:** es una metodología de valoración económica que implica medir y comparar todos los beneficios y costos de un proyecto o programa público determinado (Barzev, 2002). Es una herramienta que guía la toma de decisiones (Snell, 2011).

**Bienes ambientales:** Recursos tangibles e intangibles utilizados por los humanos como insumos en la producción o consumo final y que se transforman en el proceso (Barzev, 2002).

**Cuenca hidrológica:** Es la unidad del territorio, delimitada por un parte aguas, es decir, aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción XVI).

**Eutroficación:** Enriquecimiento del agua por nutrientes, especialmente compuestos de nitrógeno y fosforo, los cuales aceleran el crecimiento de algas y macrófitas en los cuerpos de agua (CONAGUA, 2017). A este proceso también se le llama eutrofización.

**Gestión integrada de los recursos hídricos:** Proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable. Para la aplicación de la Ley de Aguas Nacionales en relación con este concepto se consideran primordialmente agua y bosque (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción XXIX.).

**NAME:** Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición. El volumen que queda entre ese nivel y el NAMO, llamado super almacenamiento, sirve para controlar las avenidas que se presentan cuando el nivel del vaso está cercano al NAMO. El espacio que queda entre el NAME y la máxima elevación de la cortina (corona) se denomina bordo libre y está destinado a contener el oleaje y la marea producidos por el viento, así como a compensar las reducciones en la altura de la cortina provocadas por sus asentamientos. Aplicado a ríos el NAME es el nivel de riesgo para el cual se tiene protección con obras de infraestructura hidráulica, la corona es la cota máxima de las obras de infraestructura hidráulica, correspondiente a la cota del NAME más el bordo libre (CONAGUA, 2016b).

**NAMINO:** Nivel de Aguas Mínimas de Operación de una presa (CONAGUA, 2016b).

**NAMO:** Nivel de Aguas Máximas Ordinarias. La operación de la presa se lleva a cabo entre el NAMINO y el NAMO, que es el máximo nivel con que se puede operar la presa para satisfacer las demandas. El volumen que se almacena entre el NAMO y el NAMINO se le llama volumen o capacidad útil y es con el que se satisface la demanda de agua. En cauces naturales indica la cota a partir de la cual empieza el desbordamiento y sirve para tomar acciones respecto a protección civil y otras medidas pertinentes (CONAGUA, 2016b).

**Percepción social:** Forma de evaluación de la realidad social, a través de referentes ideológicos y culturales que reproducen y explican la realidad y que son aplicados a las distintas experiencias cotidianas para ordenarlas y transformarlas (Vargas-Melgarejo, 1994).

**Región hidrológica:** Área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos, cuya finalidad es el agrupamiento y sistematización de la información, análisis, diagnósticos, programas y acciones en relación con la ocurrencia del agua en

cantidad y calidad, así como su explotación, uso o aprovechamiento. Puede estar integrada por una o varias cuencas hidrológicas, por lo que sus límites son distintos en relación con la división política por estados, Ciudad de México y municipios. Una o varias regiones hidrológicas integran una Región Hidrológico – Administrativa (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción XVI a).

**Región Hidrológico - Administrativa:** Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos, integrada por una o varias regiones hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos y el municipio representa, como en otros instrumentos jurídicos, la unidad mínima de gestión administrativa en el país (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción XVI b).

**Reglas formales:** son aquellas establecidas en leyes, códigos y programas

**Reglas no formales:** son aquellas instauradas por usos y costumbres de las personas, en México en particular las leyes formales protegen y reconocen éstas en los pueblos indígenas.

**Saneamiento del agua:** Procesos de conducción, tratamiento, alejamiento y descarga de las aguas residuales (NOM-002-SEMARNAT-1996, fracción 3.17).

**Servicios ambientales:** son aquellos que prestan los ecosistemas en beneficio de las personas. También se denominan servicios ecosistémicos, éstos contemplan servicios de suministro (tales como provisión de alimentos y el agua), servicios de regulación (por ejemplo, regulación de inundaciones, sequías, la degradación del suelo y las enfermedades), servicios de base (como la formación del suelo y los ciclos de los nutrientes), y servicios culturales (tales como beneficios recreacionales, espirituales, religiosos), así como otros beneficios intangibles (MEA, 2003). En el caso de las cuencas hidrológicas, son aquellos de interés social, tales como regulación climática, conservación de los ciclos hidrológicos, control de la erosión, control de inundaciones, recarga de acuíferos, mantenimiento de escurrimientos en calidad y cantidad, formación de suelo, captura de carbono, purificación de cuerpos de agua, así como conservación y protección de la biodiversidad (Ley de Aguas Nacionales, artículo 3°, fracción XLIX).

**Termoclina:** Una de las formas de estratificación de los cuerpos de agua, donde se establecen capas horizontales como consecuencia de diferencias en la densidad (por diferencias de salinidad o temperatura). Es una capa ubicada a cierta distancia

bajo la superficie, donde ocurre una disminución brusca de la temperatura en relación con la profundidad (CONAGUA, 2017).

**Tratamiento del agua:** Procesos mediante los cuales se remueven o estabilizan los contaminantes presentes en el agua residual (NOM-001-SEMARNAT-1996, fracción 3.27)

**Valor de no uso:** Bienestar de las personas por saber que un bien o servicio ambiental existe, aunque no hagan uso directamente de él, también se conoce como valor de existencia (Cristeche y Penna, 2008).

**Valor de uso:** Valor de los bienes o servicios ecosistémicos que son empleados por las personas con fines de consumo y producción (Cristeche y Penna, 2008).

**Valor económico total:** valor marginal por debajo de algún umbral mínimo, de los bienes o servicios ambientales (Cristeche y Penna, 2008).

**Valor de uso directo:** Valor de los bienes o servicios de los ecosistemas que son utilizados de forma directa por los humanos, por ejemplo, la producción de alimentos (Cristeche y Penna, 2008).

**Valor de uso indirecto:** Valor de los bienes o servicios ecosistémicos asociado a las funciones de soporte de los ecosistemas, los cuales se consideran como intermediarios para la producción final e servicios, por ejemplo, la infiltración de agua al subsuelo por parte de los bosques (Cristeche y Penna, 2008).

**Valor de opción:** Valor asociado al bienestar de las personas por la preservación de los ecosistemas, al tener la oportunidad de utilizar en el futuro los servicios ecosistémicos (Cristeche y Penna, 2008).

## RESUMEN

El presente trabajo analiza desde una perspectiva integral el uso de tecnologías de tratamiento de agua en México, para ello se evalúa la factibilidad financiera y el desempeño técnico de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de lodos activados (PLA) en combinación con la ingeniería conceptual de un humedal artificial (HA), en tres escenarios: PLA, PLA-HA y HA.

El caso de estudio que se utiliza es la PLA ubicada en la localidad de San Juan, en el municipio de Amanalco, ya que esta planta se diseñó para tratar el agua proveniente del río Amanalco, el cual es el principal aporte a la presa Valle de Bravo.

Actualmente dicha presa enfrenta un severo problema de eutroficación que incrementa los costos de la potabilización del agua en la planta potabilizadora “Los Berros” e impacta negativamente en el turismo de la zona. La eutroficación es un complejo problema que afecta a los cuerpos de agua, incide de forma negativa en los ecosistemas y en la provisión de agua para consumo humano.

A su vez, la presa Valle de Bravo es el principal aporte del sistema Cutzamala, un sistema de presas construido para proveer de agua a las zonas metropolitanas de las ciudades de México y Toluca.

El río Amanalco a lo largo de su cauce arrastra sedimentos resultado de la erosión del suelo por la agricultura y en él se vierten aguas residuales por falta de drenaje, así como de tecnologías de tratamiento en la zona. La PTAR “Amanalco” se diseñó para tratar el agua residual de la cabecera municipal y de localidades aledañas. Fue construida por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), actualmente la planta no opera todo el tiempo debido a que ello es responsabilidad del municipio y éste no tiene los recursos suficientes para hacerlo.

Ante este panorama, el presente trabajo evalúa la opción de instalar humedales artificiales, debido a su bajo costo de operación, fácil mantenimiento y su capacidad de retención de nutrientes para disminuir la eutroficación.

Se realizó la evaluación de una propuesta de ingeniería conceptual de un humedal artificial de flujo subsuperficial acoplado a la planta de tratamiento ya instalada, en un escenario de mejora de la operación de ésta, en cuanto a la remoción de contaminantes del agua, así como su desempeño económico. También se analizan los factores sociales, institucionales y económicos relacionados con el tratamiento del agua en el área de estudio, a partir del Marco de administración y transición (MTF).

Este trabajo, al estar enmarcado en el contexto de las ciencias de la sostenibilidad, tiene como objetivo analizar los factores sociales, ambientales y económicos que están relacionados con el tratamiento de agua, específicamente con la implementación de HA como apoyo a la PLA o bien sin ella, para ello se hace uso de metodologías del tipo cuantitativas: análisis de datos estadísticos. Así como cualitativas: entrevistas a actores clave relacionados con el recurso hídrico en la cuenca.

Por ello, en el capítulo I se hace una introducción en la que se describen los objetivos, preguntas de investigación e hipótesis, así como una descripción del área de estudio.

En el capítulo II, se describe el marco de administración y gestión, que se utiliza como referencia para el análisis, así como los conceptos necesarios para entender el tratamiento del agua, la situación en México y el problema de la eutroficación.

Por su parte, el diseño metodológico es descrito en el capítulo III, en el cual se considera la forma de producción de datos de forma cualitativa y cuantitativa, debido a la naturaleza de las preguntas de investigación planteadas.

En el capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos, los cuales muestran que al integrarse los porcentajes de remoción de fósforo de cada tecnología el escenario 1 resulta tener el valor más bajo de rentabilidad en los valores máximos de costos de operación y remoción de fósforo. La combinación PLA-HA es la más favorecida en la valoración máxima, mientras que en el rango mínimo es la PLA la de mayor rentabilidad.

En los tres escenarios si no se considera el valor asociado a la recreación, el tratamiento del agua resulta ser financieramente inviables. En el caso de la valoración sin considerar el valor de los servicios ambientales de los HA, el escenario PLA-HA también resulta financieramente inviable.

El acoplamiento de ambas tecnologías es factible desde el punto de vista de la ingeniería, sin embargo, es complicado debido a los factores topográficos de la zona, así como a sus características sociales.

Para finalizar, se encuentran las referencias bibliográficas y anexos.

## I INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Secretaría de la Convención Ramsar (2013), la demanda de agua para el desarrollo de actividades antropogénicas es creciente y ha originado la sobreexplotación de los recursos hídricos, lo que compromete la calidad del ambiente y a su vez el bienestar humano. Ante esta situación se han propuesto diversas tecnologías para colectar, tratar, purificar o reusar el agua residual producida en las distintas actividades humanas con el propósito de disminuir la presión sobre estos recursos (Manzardo, Mazzi, Rettore y Scipioni, 2014).

Una tecnología de bajo costo de operación y mantenimiento, así como con alto potencial para tratamiento del agua en los países en desarrollo, son los humedales artificiales (HA), los cuales constituyen una tecnología que imita los procesos depuradores que se efectúan en ecosistemas de humedales naturales (Kivaisi, 2001).

En México, la tecnología más usada para realizar el tratamiento de agua son las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de lodos activados (PLA) (CONAGUA, 2015b), sin embargo, debido a que en la legislación en materia de aguas recae en el nivel municipal el tratamiento de este recurso, aproximadamente el 20% de PTAR en el país se encuentran sin operar, ya que este nivel de gobierno cuenta con pocos recursos económicos y no priorizan dicha acción (Subdirección general de agua potable, drenaje y saneamiento, 2014).

Ya que los humedales artificiales tienen un bajo costo de operación y mantenimiento (Wu *et al.*, 2015), se propone utilizarlos como complemento a la PLA ya instalada, ello potencialmente reduciría los costos operativos de esta última tecnología.

Derivado de una selección de casos de estudio, a través del Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP, Analysis Hierarchy Multicriterio), cuya principal característica es que todos están relacionados con humedales artificiales, se seleccionó el caso de Amanalco de Becerra (Anexo 1).

La Presa Valle de Bravo, forma parte del sistema Cutzamala, una obra de ingeniería que actualmente provee aproximadamente del 30% de agua que consumen las zonas metropolitanas de las ciudades de México y Toluca.

El río Amanalco es el principal aporte a la Presa Valle de Bravo, por lo que es importante atender los problemas de contaminación que el río presenta, ya que en

los últimos años la presa presenta problemas de hiper-eutroficación y algunos estudios señalan que para aminorar estos problemas es necesario disminuir la contaminación en sus principales aportes (Olvera-Viascán, 1992).

Derivado de lo anterior los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

## **I.1 Objetivos**

Identificar los factores socioeconómicos, ambientales e institucionales que podrían influir en la implementación de humedales artificiales (HA) como apoyo a la planta de tratamiento de aguas residuales de lodos activados (PLA) ya instalada en la cabecera municipal de Amanalco de Becerra y con base en ello elaborar una propuesta que contribuya con el mejoramiento de la calidad del río Amanalco.

### **Específicos:**

- Analizar las causas de la eutroficación de los cuerpos de agua y las posibles razones por las cuales la PLA no disminuye la contaminación.
- Evaluar la viabilidad de la implementación de humedales artificiales teniendo en cuenta los diversos actores sociales, su percepción de los problemas y las alternativas de solución que visualizan, así como su disposición a participar en ellas. Identificar y evaluar económicamente los servicios ambientales que proporcionarían los humedales artificiales en el estudio de caso.
- Evaluar el desempeño económico y ambiental de la combinación de HA con una PLA.

A partir de los objetivos antes descritos, las preguntas que se pretenden responder con este trabajo son:

1. ¿Cuáles son las causas centrales de la eutroficación?, ¿cómo participan distintos actores en las prácticas que los generan?, ¿cuáles son las percepciones de los distintos actores? y ¿qué alternativas proponen éstos?
2. ¿Cuál es la percepción de los habitantes de Amanalco de Becerra respecto al río, sus problemas, causas y alternativas de éstos?
3. ¿Cómo es la gestión actual (estructura de toma de decisiones formal e informal, espacios de organización y participación; leyes y reglas formales e informales de los recursos hídricos en el área de estudio?

4. ¿Cuáles serían los incentivos de los habitantes de Amanalco de Becerra para apropiarse de una ecotecnología de tratamiento de agua como lo son los humedales artificiales (HA)?
5. ¿Cuál es el costo de los servicios ambientales que prestarían los HA en el área de estudio?
6. ¿Cuál sería el desempeño ambiental y económico de acoplar un HA a una PLA?

## **I.2 Hipótesis**

- La percepción social de deterioro (eutroficación) del río en la comunidad, y entre las instituciones formales, permitirá implementar HA como apoyo a la PLA o en operación independiente, para incrementar la remoción de contaminantes del efluente vertido al río.
- El análisis económico costo-beneficio, al considerar los porcentajes de remoción de fósforo, da más elementos para evaluar las diversas opciones tecnológicas de tratamiento (PLA, PLA-HA y HA).
- La combinación de un HA con una PLA ya existente, mejorará la calidad del agua del río Amanalco a un menor costo social y económico, al disminuir contaminantes en el río a un menor costo operativo.

## **I.3 Descripción del área de estudio**

El área de estudio se localiza en la Región hidrológica 18 Balsas, también forma parte de la Región Hidrológica Administrativa (RHA) XIII, dentro de la cuenca Río Cutzamala, en la subcuenca Tilostoc en la microcuenca Amanalco-Valle de Bravo, como se muestra en la Figura 1.

La Cuenca Valle de Bravo-Amanalco es estratégica para proveer de agua a la zona centro del país, sin embargo, sufre de graves problemas de deterioro ambiental (Bonfil y Madrid, 2006), debido a diversos factores, algunos de ellos son (Madrid, 2011):

- Acelerada urbanización y nula planeación del territorio
- Incremento de la demanda de agua, carreteras y espacios recreativos
- Vedas repentinas para el aprovechamiento forestal y debilitamiento de las empresas forestales comunitarias
- Sustitución de técnicas agrícolas tradicionales por otras de mayor impacto ambiental y social (uso excesivo de agroquímicos, remoción de barreras vivas, uso de tractores).

- Debilitamiento de las instituciones locales a cargo del uso, acceso y manejo de los recursos naturales.



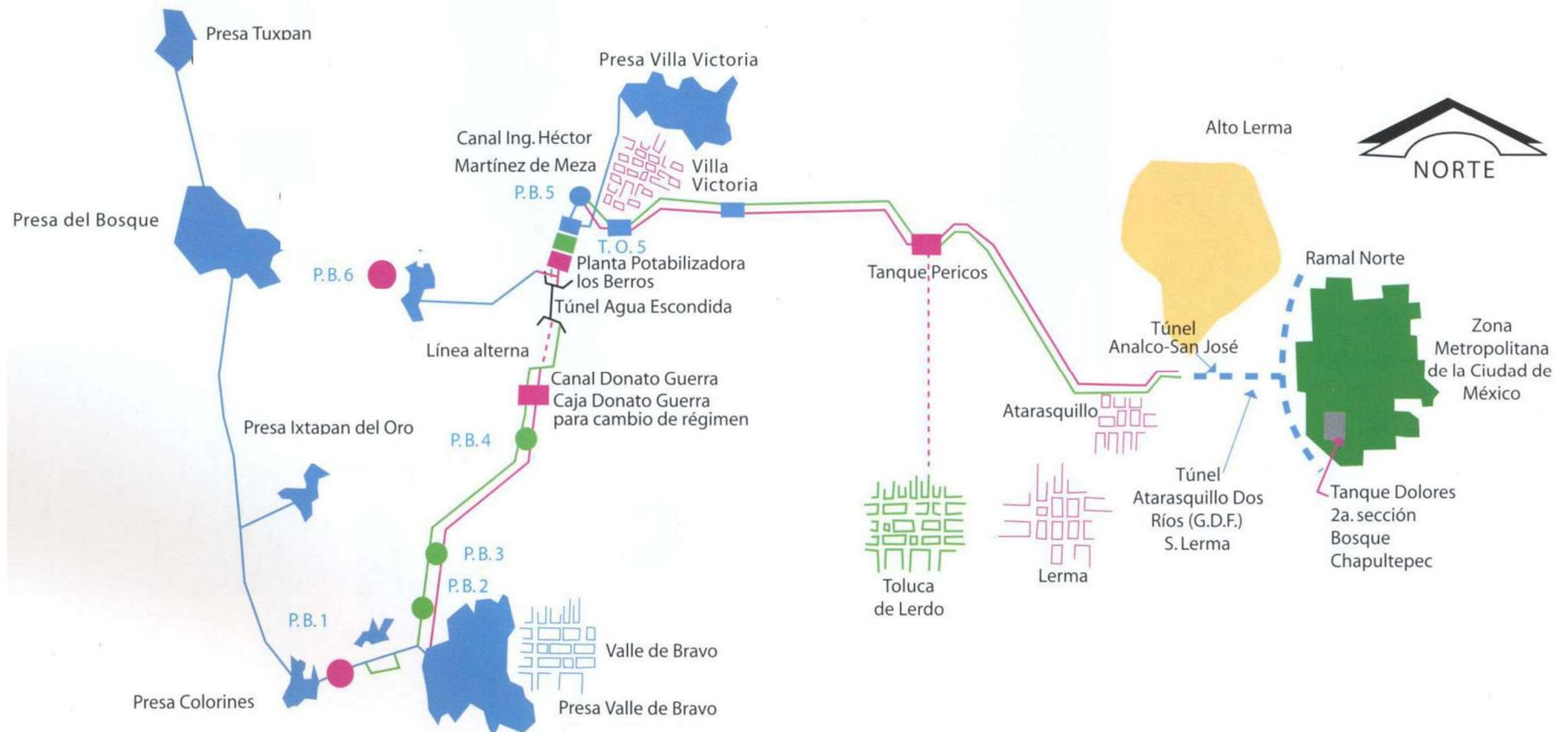
**Figura 1.- Cuenca del área de estudio**

**Fuente: Elaborado con base en CONAGUA, 2015a; OCAVM, 2015**

Esta cuenca forma parte del Sistema Cutzamala, el cual es un complejo hídrico de producción, almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua dulce para la población y la industria de la Ciudad de México y del Estado de México. Está integrado por siete presas derivadoras y de almacenamiento, seis estaciones de bombeo y una planta potabilizadora (Figura 2; Banco Mundial, 2015).

El Sistema bombea agua desde una altura de 1,600 metros sobre el nivel del mar (msnm) en su punto mínimo y llega hasta 2,702 msnm en su punto más alto. Su consumo de energía eléctrica es aproximadamente de 2,200 millones de kWh al año (Figura 3; Banco Mundial, 2015).

El presente estudio se centra en el municipio de Amanalco y retoma algunos aspectos del municipio de Valle de Bravo, debido a que la cuenca se encuentra en un 48% en el municipio de Valle de Bravo y en un 35 % en Amanalco de Becerra, en el Estado de México (Bonfil y Madrid, 2006).



**Figura 2.- Esquema del Sistema Cutzamala**  
**Fuente: Tomado y adaptado de CONAGUA, 2005**

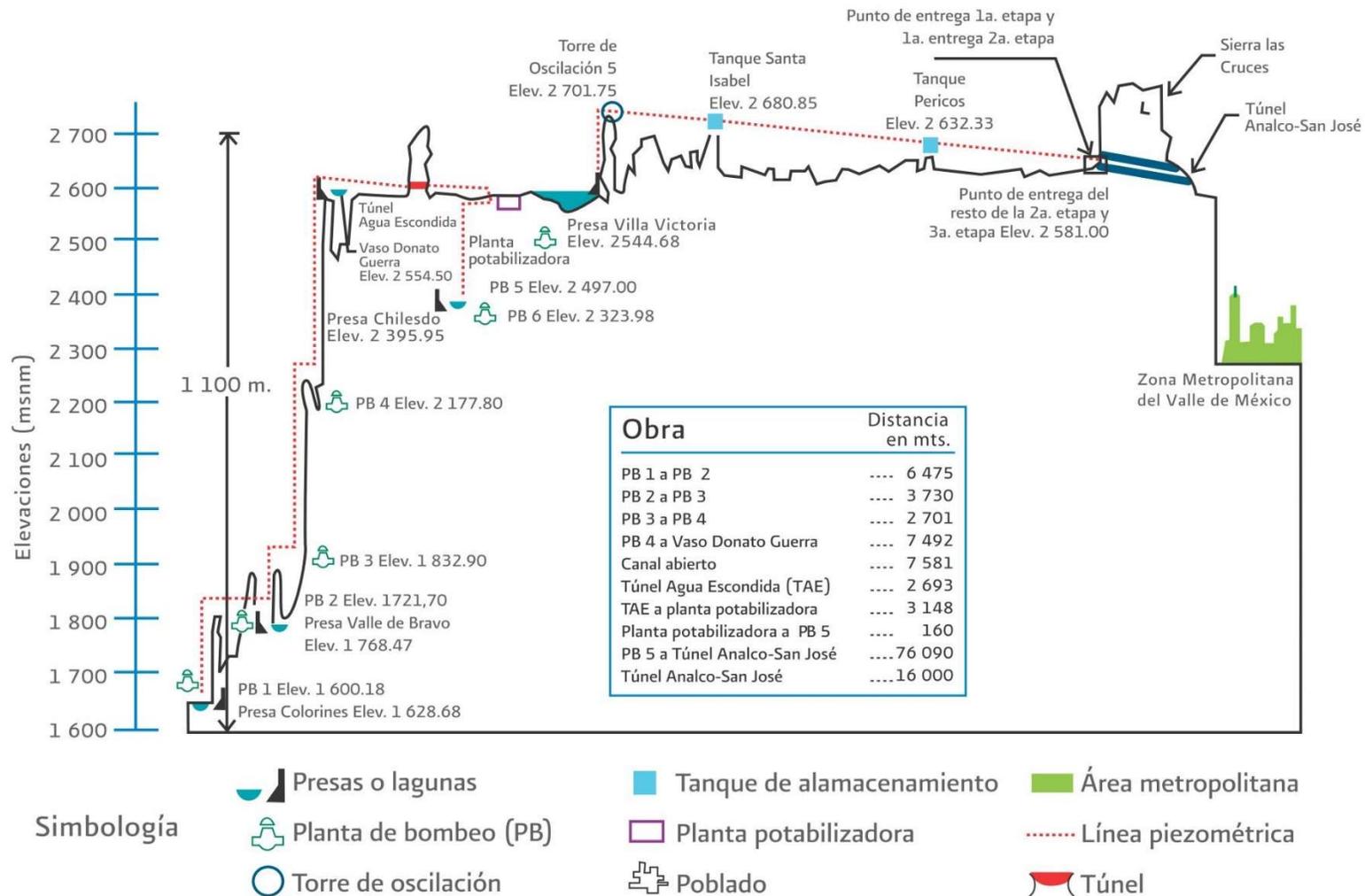


Figura 3.- Perfil de altura del Sistema Cutzamala

Fuente: CONAGUA, 2011

## Aspectos jurídicos del área de estudio

El 15 de noviembre de 1941, el entonces presidente Manuel Ávila Camacho publicó el Decreto que declara zona protectora forestal los terrenos constitutivos de las cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec, en el Estado de México.

El 23 de junio de 2005, se publicó en el Diario Oficial de la Federación que la zona decretada en 1941 se había determinado como área natural protegida (ANP) de competencia federal, con la categoría de área de protección de recursos naturales, debido a “la importancia que tiene al formar parte del Sistema Cutzamala y dotar de agua potable a la zona metropolitana de la ciudad de México y su zona conurbada, por lo que resulta estratégico para el bienestar y la paz social de una de las regiones más densamente pobladas del país” (DOF, 2005).

El área de estudio al ubicarse dentro de una ANP, está sujeta a lo señalado en el artículo 53 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA):

***Artículo 53.-** Las áreas de protección de recursos naturales, son aquellas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal, siempre que dichas áreas no queden comprendidas en otra de las categorías previstas en el artículo 46 de esta Ley.*

*Se consideran dentro de esta categoría las reservas y zonas forestales, las zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, particularmente cuando éstos se destinen al abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones.*

*En las áreas de protección de recursos naturales sólo podrán realizarse actividades relacionadas con la preservación, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en ellas comprendidos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológica, de conformidad con lo que disponga el decreto que las establezca, el programa de manejo respectivo y las demás disposiciones jurídicas aplicables.*

El área cuenta con el plan de ordenamiento ecológico Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, en el que se autorizan las actividades relacionadas con la preservación, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, es decir, la

instalación de humedales artificiales es una actividad compatible con el decreto de la zona (Gaceta de gobierno, 2003)

La tenencia de la tierra en las zonas donde se pretende realizar la construcción de los humedales artificiales es propiedad comunal, se ubica dentro del núcleo agrario San Juan 1ª sección, los terrenos son de uso común.

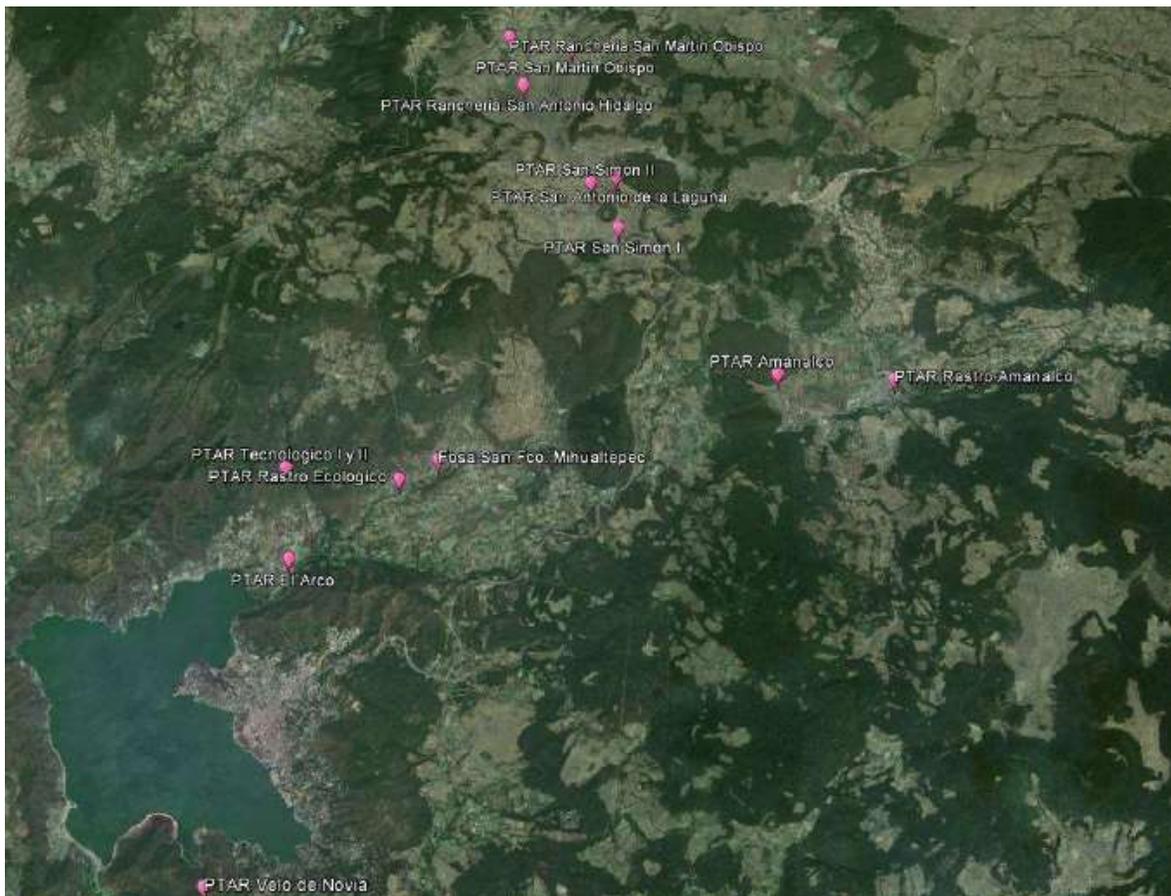
A su vez, en la Ley de Aguas Nacionales (LAN), en su artículo tercero, fracción XLVII, se reconoce lo siguiente:

***XLVII. “Ribera o Zona Federal”:*** *Las fajas de diez metros de anchura contiguas al cauce de las corrientes o al vaso de los depósitos de propiedad nacional, medidas horizontalmente a partir del nivel de aguas máximas ordinarias. La amplitud de la ribera o zona federal será de cinco metros en los cauces con una anchura no mayor de cinco metros. El nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la creciente máxima ordinaria que será determinada por la comisión o por el Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, de acuerdo con lo dispuesto en los reglamentos de esta Ley. En los ríos, estas fajas se delimitarán a partir de cien metros río arriba, contados desde la desembocadura de éstos en el mar. En los cauces con anchura no mayor de cinco metros, el nivel de aguas máximas ordinarias se calculará a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos durante diez años consecutivos (...) En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno. La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad.*

Por lo que, de acuerdo con la Ley, las zonas de al menos diez metros de anchura contigua al cauce de los ríos son de propiedad federal.

## Planta de tratamiento de aguas residuales “Cabecera municipal de Amanalco de Becerra”

De acuerdo con la Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco (2014), en la cuenca existen 14 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con una capacidad total de tratamiento instalado de aproximadamente 193 litros por segundo (LPS) y una inversión de 90 millones de pesos (en este dato únicamente se contabilizan 8 plantas). En la Figura 4 se observan las PTAR de la cuenca, indicadas con puntos color rosa.



**Figura 4.- PTAR en la cuenca**

**Fuente: Tomado y adaptado de Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, 2014**

La PTAR de interés para la presente investigación se llama Amanalco o también se le denomina simplemente cabecera municipal, tiene una capacidad de tratamiento de 18 LPS, la tecnología que utiliza para la degradación de contaminantes es lodos activados (PLA), inició operaciones en 2006, no se tiene certeza de cómo operó desde este año hasta su rehabilitación en 2014. La última rehabilitación general se realizó en 2016, con un costo de 400,000 MXN (SAIMEX, 2017). Actualmente se

opera intermitentemente, sin bitácoras de operación, por lo que resulta difícil mantener un monitoreo preciso de la operación.

Dicha PLA es operada por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), porque el municipio de Amanalco no tiene los recursos suficientes para operarla con regularidad.

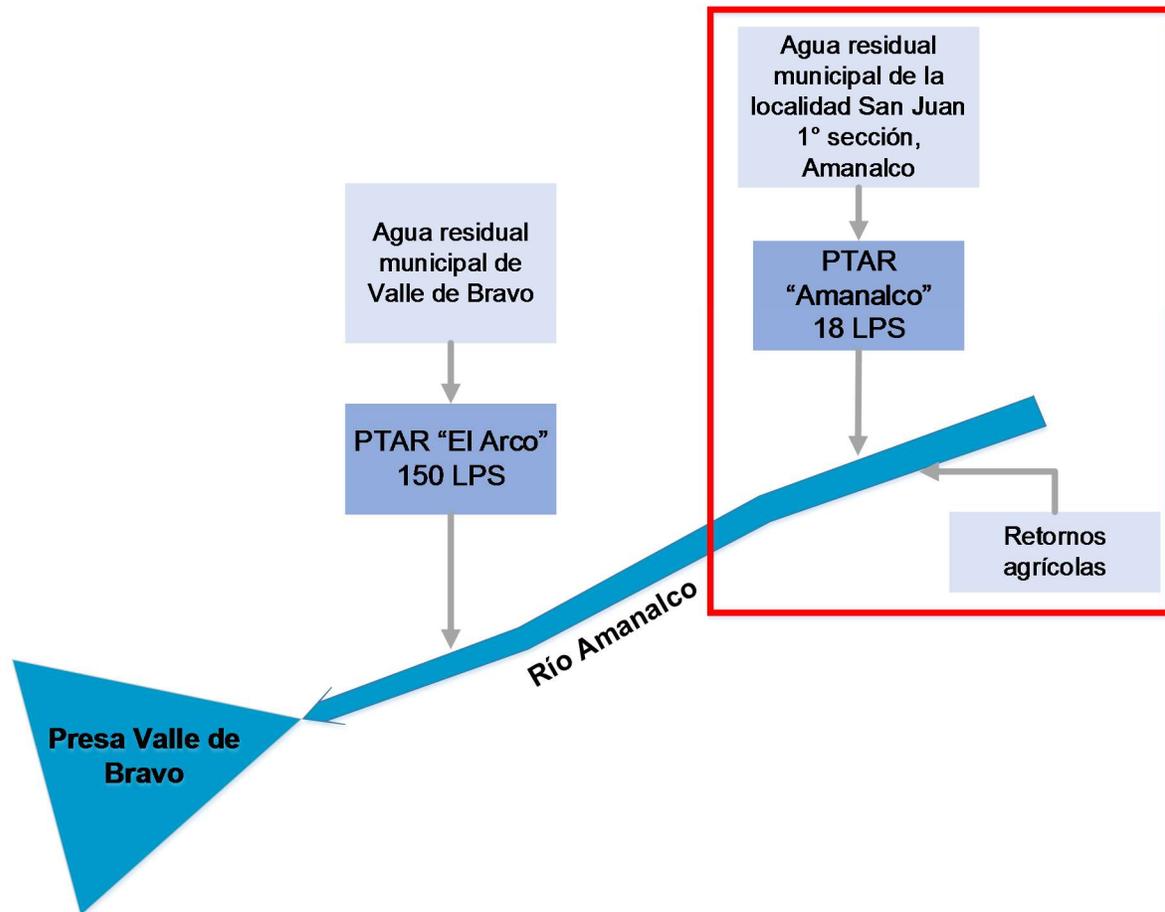
La PLA fue diseñada para tratar el agua residual proveniente de la cabecera municipal de Amanalco de Becerra y de la localidad de San Juan 1° sección, sin embargo, no se realizó la conexión del colector proveniente de la cabecera municipal por factores topográficos del terreno. Los colectores actualmente provocan la inundación, en época de lluvias, de la zona conocida como el Valle o la laguna, zona aledaña a la PLA.

Por otro lado, otra PTAR que también vierte su efluente al río Amanalco es “El Arco”, la cual tiene una capacidad de diseño de 150 LPS, ésta trata el agua proveniente de la cabecera municipal de Valle de Bravo, junto con la PTAR Amanalco abarcan el 87% de la capacidad de tratamiento instalada en la cuenca (Calculado con base en Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, 2014).

La PTAR “El Arco” opera casi al 70% de su capacidad de diseño, es operada por CONAGUA a través de un convenio tripartita entre la federación, estado y municipio.

En la Figura 5 se muestra el esquema de las PTAR, en rojo se señalan los aspectos de estudio de la presente investigación, es decir, únicamente el impacto de la PTAR Amanalco sobre el río del mismo nombre y para el cálculo económico, su efecto en la presa Valle de Bravo.

El río Amanalco está clasificado en la Ley Federal de Derechos como un cuerpo receptor tipo B, únicamente en el municipio de Amanalco, por lo que en el municipio de Donato Guerra y Valle de Bravo, puede considerarse tipo A, el río a su vez descarga a un cuerpo receptor tipo C, es decir, la Presa Valle de Bravo, esto es importante que se considere en la gestión de pagos por descarga de contaminantes.



**Figura 5.- Infraestructura de tratamiento en la zona de estudio**

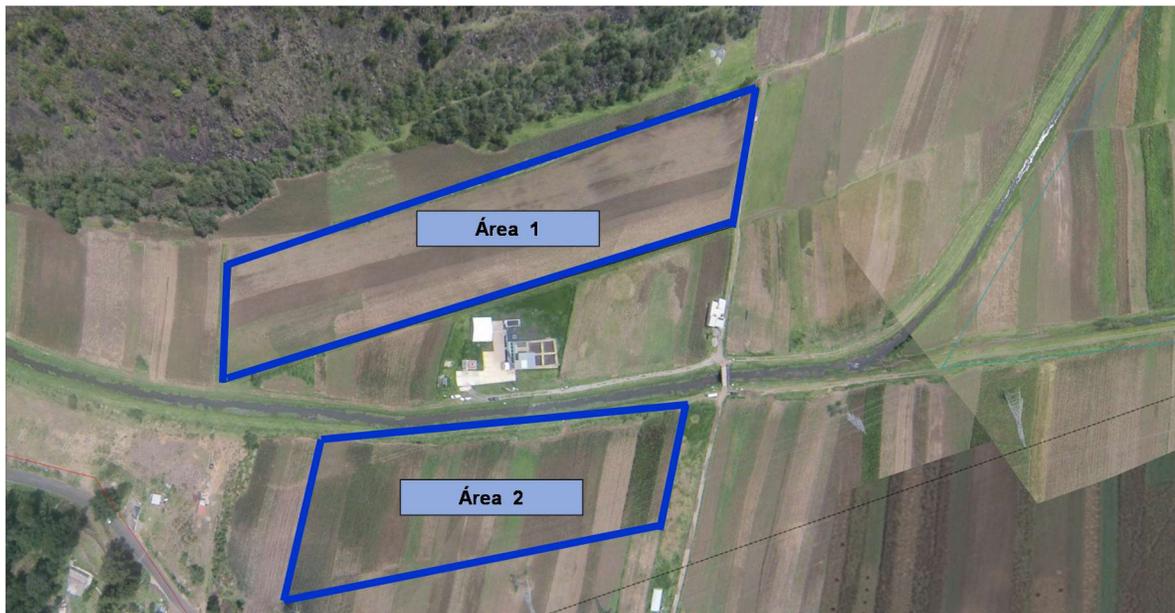
En la Figura 6, se muestra el área de estudio, la cual abarca básicamente la localidad de San Juan en Amanalco de Becerra, ya que es la zona aledaña a la PLA.

En la Figura 7 se observan las zonas aledañas potenciales para la instalación de humedales artificiales (ya que son predios contiguos a la PLA) y son parte de la zona federal, desde la perspectiva de las reglas formales.



**Figura 6.- Área de estudio (municipio de Amanalco de Becerra)**

Fuente: Generación propia con base en Google earth, 2015



**Figura 7.- Áreas potenciales para la instalación de Humedales artificiales**

Fuente: OCAVM, 2015

## II MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

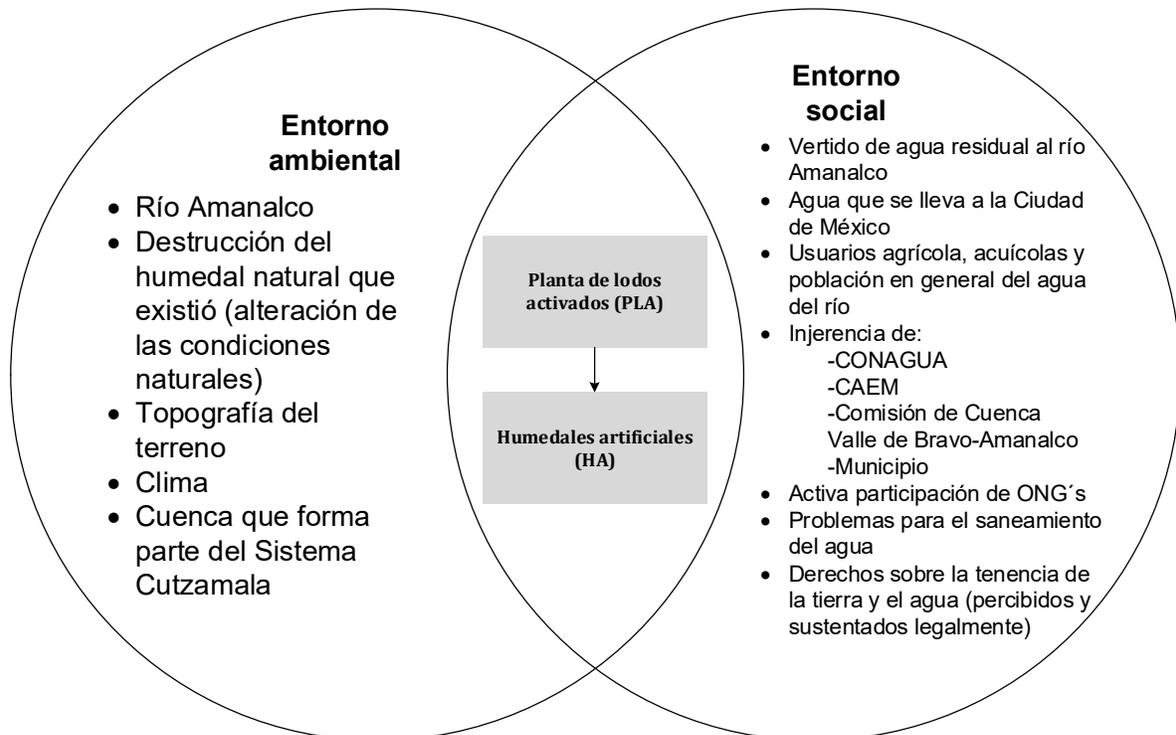
El problema de abastecimiento de agua a las poblaciones y su tratamiento, no es un caso aislado en el mundo. Los retos ambientales que el planeta enfrenta son muy complejos, tales como el cambio climático, pérdida de biodiversidad, degradación de los recursos naturales, entre otros, derivado de la experiencia de varias personas que se han dedicado al estudio de estos problemas complejos, se ha observado que no es posible analizarlos desde un enfoque disciplinario (Binder, Hinkel, Bots, y Pahl-Wostl, 2013).

Por lo anterior, se requiere realizar investigación interdisciplinaria, de la cual se ha llegado al término “sistema socio-ecológico”, dicho concepto ha sido desarrollado y aplicado en diferentes estudios en los que la interacción entre los sistemas sociales y los ecológicos ha sido explícitamente considerada, al mismo concepto también se le ha llamado “sistema socio-ambiental” (Binder *et al.*, 2013).

En el presente estudio, un sistema socio-ecológico o socio-ambiental, es aquel que consta de subsistemas ecológicos y sociales que influyen fuertemente entre sí a escalas locales y regionales, para cada subsistema existen factores externos (por ejemplo, el clima regional y los mercados internacionales) que no están en condiciones locales y factores internos, que responden a factores externos y que afectan y se ven afectados por procesos locales (Whiteman *et al.*, 2004).

En la Figura 8, se muestra el sistema socio-ambiental, del caso acoplar HA a la PLA ya existente. Para el sistema ecológico únicamente se considera la fracción de longitud que pasa por la PLA, no obstante el sistema social, tiene componentes locales (vertido de aguas residuales a él) y regionales (el agua llega a la Presa, de la que la Ciudad de México y Toluca son usuarias, las diversas instituciones gubernamentales involucradas, las asociaciones civiles, entre otros).

En el país, para hacer frente al tratamiento del agua (únicamente se abordará el agua de tipo municipal), se han construido diversas PTAR, las cuales se concesionan a particulares o son administradas por los municipios, con ello se considera a las instituciones o las opciones tecnológicas disponibles para realizar el tratamiento de agua como panaceas, es decir, se suponen un modelo único de gobierno-sistema, como la solución a todos los problemas ambientales (Ostrom, Janssen y Anderies, 2007).



**Figura 8.- Sistema socio-ambiental del caso de estudio**

Fuente: Tomado y adaptado de Whiteman *et al.*, 2004

Las panaceas institucionales o tecnológicas, como las PTAR o la privatización, han sido aplicadas a todos los tipos de agua (y sus problemas) alrededor del mundo sin reflexionar críticamente ni monitorear sus oportunidades y las condiciones necesarias para su actuación satisfactoria (Pahl-Wostl, Holtz, Kastens y Knieper, 2010).

Los problemas de la administración del agua son producto de estrategias mecanicistas y tecnocráticas que niegan la complejidad de la dimensión humana (Pahl-Wostl *et al.*, 2010), tal es el caso de la cuenca Valle de Bravo-Amanalco.

Los marcos teóricos o conceptuales se han desarrollado para establecer un lenguaje común de análisis y proveer de una estructura a la investigación, lo que constituye una forma de analizar la realidad (Binder *et al.*, 2013).

Debido a la naturaleza de la investigación, en la que se tienen componentes sociales y ambientales, se requiere un marco teórico que permita analizar a escala regional y local estas componentes, es por ello que se utiliza el de administración y gestión (MTF, por sus siglas en inglés: *Management and Transition Framework*).

## II.1 Marco de administración y transición (MTF)

Este marco es una propuesta interdisciplinaria, conceptual y metodológica, que proporciona soporte para el análisis de sistemas de agua (incluido el ecológico), sus procesos de administración y los regímenes de gobernanza. El MTF, está integrado por los siguientes elementos (Pahl-Wostl *et al.*, 2010; Ostrom, 2005):

**La administración social adaptativa:** Proceso sistémico que provee de prácticas y políticas de administración para un aprendizaje, a partir de resultados y la implementación de estrategias, tiene en cuenta los cambios en factores externos.

**Aprendizaje social y regímenes de transición:** El enfoque de este concepto es el aprendizaje de la entidad social como un todo y la aparición de las propiedades de un colectivo de actores como las reglas y prácticas compartidas. El aprendizaje social gira en torno a los procesos de interacciones de múltiples actores, integrados en un contexto estructural, social y ambiental específico y que conducen a resultados específicos.

**El marco de Análisis y Desarrollo Institucional (AID):** propuesto por Elinor Ostrom y otros colaboradores, introduce la caracterización de los procesos políticos y las interacciones sociales, en las cuales se considera las preferencias, el intercambio de bienes y servicios, resolución de problemas, o desarrollo de nuevas reglas. En la Figura 9 se muestra la esquematización del marco AID.

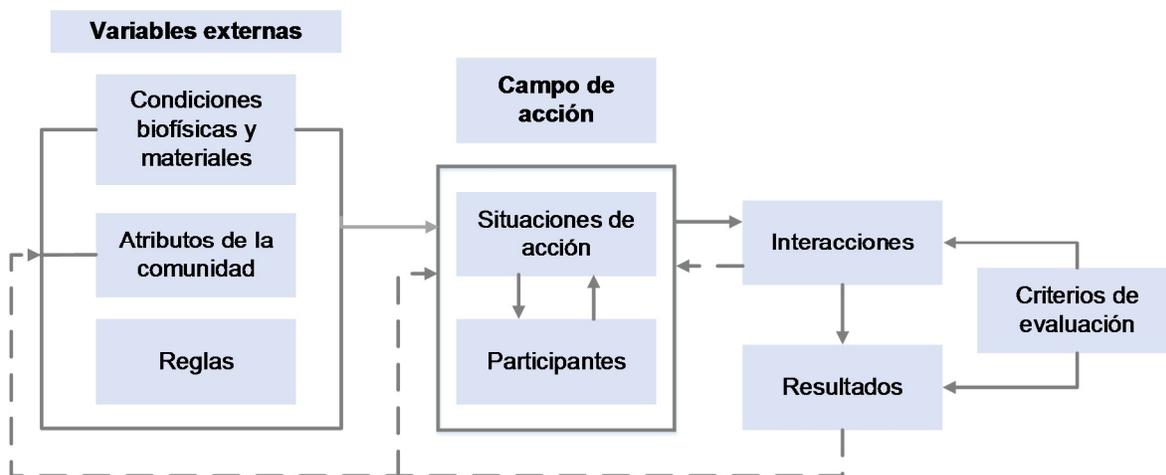


Figura 9.- Esquema del marco de Análisis y Desarrollo Institucional

Fuente: Ostrom, 2005

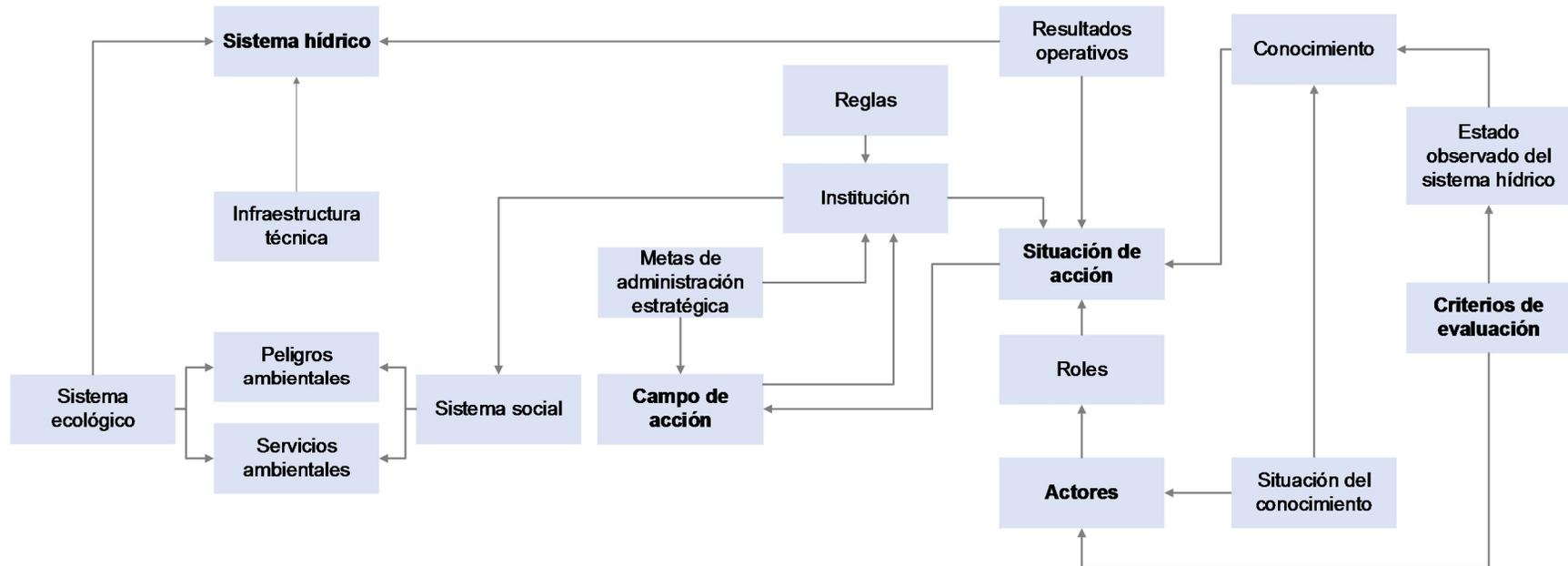


Figura 10.- Diagrama del marco teórico de administración y transición (MTF)

Fuente: Tomado y adaptado de Pahl-Wostl et al., 2010

En la Figura 10, se observa el diagrama que conceptualiza el MTF, a continuación se describe cada elemento que lo integra (Pahl-Wostl *et al.*, 2010):

El sistema hídrico está integrado por los componentes ambiental y humano, se acota por la localización geográfica, clima, tamaño de cuenca y otros indicadores relevantes que pudieran tener injerencia en el sistema.

El sistema ecológico comprende los componentes bióticos y abióticos del sistema hídrico, algunos de sus atributos importantes son la disponibilidad de agua, biodiversidad, grado de influencia humano, calidad de agua, capacidad de recarga natural de la cuenca, etc.

El sistema social está caracterizado por la cultura, el grado de homogeneidad/desigualdad (mapa de actores, derechos e intereses) crecimiento económico, fuerza de las instituciones, percepción social, etc.

Los servicios ambientales son los diferentes tipos de servicios que el sistema ecológico presta, para efectuar las actividades humanas.

Los peligros ambientales son las amenazas que el sistema ecológico puede proveer al sistema social, están caracterizados por la frecuencia e intensidad de eventos (inundaciones, sequías, etc.), los conflictos en torno al uso y manejo de ecosistemas y recursos.

Infraestructura técnica, se refiere a la infraestructura construida para la administración del agua, sus atributos son la escala, tiempo de vida útil, mantenimiento y tipo de propiedad.

Las instituciones pueden ser desde reglas hasta organismos públicos o privados.

Las reglas pueden ser formales (establecidas en leyes, códigos y programas) e informales (instauradas por usos y costumbres). Según sus objetivos, pueden clasificarse como se muestra en la Tabla 1:

**Tabla 1.- Componentes de cada regla**

| <b>Reglas</b>      | <b>Descripción</b>   |
|--------------------|--|
| <b>Posición</b>    | Regula las posiciones de los actores   |
| <b>Límite</b>      | Regula cómo entran o salen los actores de determinada situación de acción.   |
| <b>Elección</b>    | Regula las acciones que se asignan a determinadas posiciones de los actores.   |
| <b>Agregación</b>  | Especifica el control que ejercen los actores en determinada situación de acción.  |
| <b>Información</b> | Influyen en el nivel de información disponible sobre las acciones y su relación con los resultados en determinada situación.                                 |
| <b>Pago</b>        | Influyen en la distribución de costos y beneficios entre acciones y resultados, dada una acción.   |
| <b>Alcance</b>     | Influyen en una variable de resultado conocida, que debe (o no) o puede verse afectada como resultado de las acciones realizadas en una situación de acción. |

**Fuente: Elaborado con base en Ostrom, 2005**

El campo de acción está caracterizado por las metas de administración estratégica, los actores y el número de situaciones de acción.

Las metas de administración estratégica están caracterizadas por los objetivos de la normativa, los principales objetivos a alcanzar y el grado de integración, es decir, si los sectores se analizan por separado o se realizan análisis intersectoriales para identificar problemas emergentes e integrar la implementación de políticas.

La situación de acción es un contexto estructurado de interacción social que conduce a resultados específicos, los cuales pueden ser institucionales o conocimiento que afectan las interacciones o los resultados operacionales.

Los resultados operacionales pueden ser intervenciones físicas directas o cambios en las características sociales.

El conocimiento es una medida de información y experiencia.

Un actor puede ser un participante individual o colectivo, los cuales en determinada situación de acción pueden desempeñar ciertos roles sociales.

Los roles están basados en la comprensión de su significado y función, de acuerdo con el conocimiento y la situación de acción.

La situación de conocimiento captura la importancia de plantearse y replantearse el conocimiento adquirido en el contexto social.

El estado observado del sistema hídrico, es un específico conocimiento en una situación de acción para evaluar el estado del sistema hídrico.

Los criterios de evaluación asignan pesos a costos y beneficios, pueden relacionarse a diferentes escalas. Los atributos del estado observado del sistema hídrico son indicadores de sostenibilidad ambiental, indicadores de sostenibilidad económica, indicadores de sostenibilidad social e indicadores de desempeño del sistema.

En la presente investigación, el MTF se utiliza para evaluar los cambios realizados en la infraestructura para realizar el tratamiento de agua.

## **II.2 Los recursos hídricos: perspectiva actual y futura**

El uso y abuso en el recurso hídrico se ha intensificado en las últimas décadas, por lo que actualmente es más común la escasez de agua, degradación de su calidad y la destrucción de los ecosistemas, por el vertimiento de aguas residuales a ríos y ambientes costeros; lo anterior tiene afectaciones negativas en el ámbito económico, social y político del país (Carmona – Lara, 2007).

Por lo que invertir en sistemas de saneamiento de agua, en países en desarrollo, trae varios beneficios económicos y sociales, ya que este recurso desempeña un papel fundamental en el desarrollo social (Katko y Hukka, 2015).

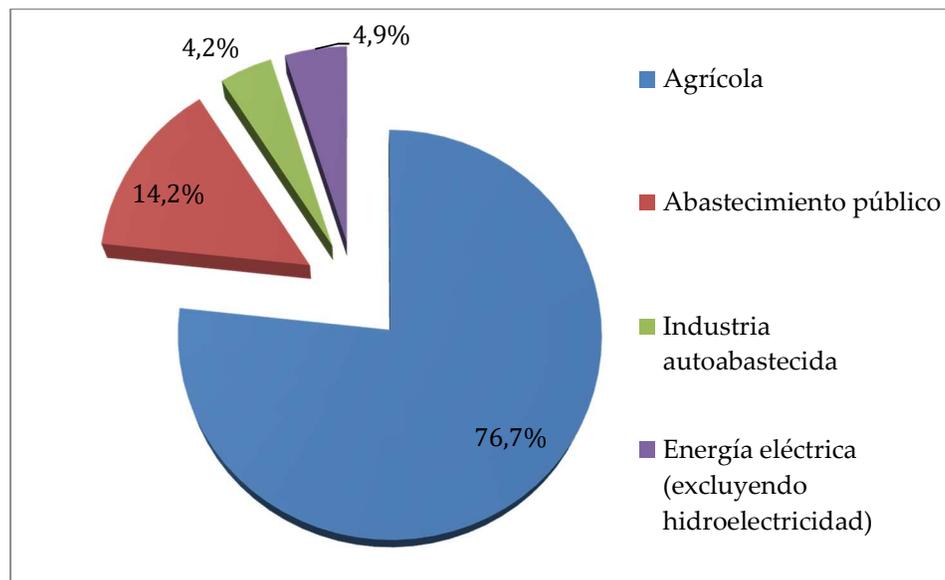
En ese sentido, en lo concerniente a los recursos hídricos y su saneamiento, el tránsito hacia la sustentabilidad requiere generar conocimientos y acciones prácticas, a través del intercambio de experiencias entre los diversos espacios institucionales, grupos científicos, programas académicos y acciones ciudadanas, en los que participan los diversos actores sociales que confluyen en la construcción de sociedades sustentables. Lo que requiere una estrategia que permita articular estructuras organizativas, acuerdos institucionales y consensos sociales que brinden marcos apropiados para el desarrollo de procesos fluidos, complejos y productivos de pensamientos compartidos que conduzcan la acción social hacia la sustentabilidad (Leff, 2006).

Actualmente el país enfrenta varios retos en materia de agua, que de no atenderse ponen en riesgo la sustentabilidad de los recursos hídricos y comprometen el

desarrollo nacional. Los mayores riesgos hídricos se asocian con la creciente degradación de los recursos naturales de las cuencas, la dinámica poblacional, el crecimiento urbano, el inadecuado ordenamiento territorial, la sobreexplotación de los acuíferos, así como la vulnerabilidad de la infraestructura y operación de los sistemas hidráulicos. La atención de estos problemas requieren de la participación de diversos sectores de la sociedad, la academia, organizaciones civiles y los tres órdenes de gobierno (Galindo – Sosa y Jiménez – Alcázar, 2015).

En varios países se ha pasado del tradicional enfoque jerárquico de la gestión del agua hacia una gestión adaptativa con un enfoque público y la colaboración intersectorial para incrementar la eficacia de la aplicación de políticas públicas (Knieper, Holtz, Kastens y Pahl – Wostl, 2010). En México se crearon los Consejos de Cuenca; sin embargo, los resultados obtenidos con estas instituciones son diferenciados y en gran medida corresponden a factores como la voluntad política de los actores locales y la complejidad de las cuencas que gestionan (Galindo – Sosa y Jiménez – Alcázar, 2015).

En el país la degradación se asocia a los usos que se le da a los recursos hídricos y el que no se traten después de su aprovechamiento o uso, hacia el año 2014, la distribución de usos de agua fue como se muestra en la Figura 11, se observa que el uso agrícola es mayoritario (CONAGUA, 2015b).



**Figura 11.- Usos de los recursos hídricos en México**

Fuente: Elaborado con base en CONAGUA, 2015

El uso que se le da al agua, representa el grado de presión sobre este recurso, en el año 2014 a nivel nacional se tenía un 19% de presión hídrica, el cual se considera

bajo, sin embargo en la zona centro, norte y noroeste el grado de presión es muy alto (CONAGUA; 2015b). Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que a su vez se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA), en la Figura 12, se observa el grado de presión hídrica por RHA.

Se observa que la RHA XIII (Valle de México y área metropolitana) presenta un índice alto de grado de presión hídrica con un 138% de sobreexplotación (CONAGUA, 2015b).

En general, la situación del recurso hídrico para la zona centro y norte del país es crítica, sin embargo, el área de estudio se encuentra en la región centro.



**Figura 12.- Grado de presión hídrica por Región Hidrológica Administrativa (RHA)**

Fuente: CONAGUA, 2015b

## II.3 El tratamiento del agua en el marco del desarrollo sostenible

### II.3.1 El derecho a un medio ambiente sano y un futuro sostenible

En 1982, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo presenta el Informe Brundtland, en el cual se institucionaliza el concepto de “desarrollo sostenible”, el mensaje principal del informe es que no es posible el crecimiento económico sostenido sin un medio ambiente sostenible, por lo que es el momento de elevar el desarrollo sostenible a la categoría de “ética global” en que la protección del medio ambiente se reconozca como el cimiento sobre el que descansa el desarrollo económico y social a largo plazo (FAO, s.f.).

Posteriormente en 1992 en la “Cumbre de la Tierra” en Brasil, la Organización de las Naciones Unidas realiza la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, en la cual se plantean 21 principios (ONU, s.f.) en los cuales básicamente se establece el actuar de los Estados en términos de protección ambiental y desarrollo social. En particular en el principio 11 se establece que:

#### *Principio 11*

*Los Estados deberán promulgar leyes eficaces sobre el medio ambiente. Las normas, los objetivos de ordenación y las prioridades ambientales deberían reflejar el contexto ambiental y de desarrollo al que se aplican.*

En septiembre de 2015 se establecieron los objetivos del desarrollo sostenible, los cuales son 17 puntos acordados por las naciones para alcanzar un mundo sin pobreza, ni desigualdad hacia el año 2030. Los objetivos abordan temas sociales y ambientales, el número 6 “Agua limpia y saneamiento” reconoce que la escasez de recursos hídricos, su mala calidad y el saneamiento inadecuado inciden negativamente en diversas aristas de la sociedad (ONU, 2015).

En la legislación mexicana, es el artículo 25 constitucional el que establece que el desarrollo debe ser sustentable y el Estado debe garantizarlo, según se cita:

**Artículo 25.** *Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea **integral** y **sustentable**, que fortalezca la Soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante la competitividad, el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución. La competitividad se entenderá como el conjunto de condiciones necesarias para generar un*

*mayor crecimiento económico, promoviendo la inversión y la generación de empleo.*

En materia ambiental en el artículo cuarto constitucional se establece que:

**Art. 4.** (...) *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*

*Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (...)*

Es decir, lo concerniente al tema del agua es una arista vital de la cuestión ambiental, por lo que el derecho a un ambiente sano y por lo tanto el tránsito hacia un desarrollo sustentable, implica necesariamente acceso a agua en cantidad y calidad aceptable que permita un adecuado desarrollo de los habitantes del país.

Además el agua, es un bien de dominio público, que requiere gestión y está estrechamente vinculado a otros temas vitales para la sociedad, lo que implica dictar las medidas para (Carmona – Lara, 2007):

- Ordenar los asentamientos humanos
- Preservar y restaurar el equilibrio ecológico
- Fomento de la agricultura, ganadería, silvicultura y demás actividades económicas
- Evitar la destrucción de los elementos naturales

Por lo que para asegurar el derecho a un ambiente sano para todo habitante del país, así como un futuro sostenible es necesario atender lo concerniente a la degradación de los recursos hídricos, porque tienen impacto en todo ámbito de las sociedades.

## II.3.2 El tratamiento del agua en el país

### II.3.2.1 Aspectos jurídicos

La legislación en el tema del agua en el país es compleja, ya que se reconoce como materia concurrente, es decir, participan en ella los distintos órdenes de gobierno, la cual se realizará a través de las leyes generales (Controversia constitucional 29/2000).

Las leyes generales distribuyen las competencias entre los niveles de gobierno, además ofrecen las bases para el desarrollo de la normatividad local y actuación de los estados y municipios. En el caso de las competencias concurrentes, establecen las acciones para la cooperación y coordinación de todos los niveles de gobierno (Trujillo – Segura, 2011).

En materia Ambiental, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, es la que establece las bases para el ejercicio de las atribuciones de los niveles de gobierno.

No obstante, en el tema del agua, es la Ley de Aguas Nacionales (LAN) la que aplica, ya que es reglamentaria del artículo 27 constitucional. Esta Ley es de carácter federal y regula la explotación, uso, aprovechamiento, distribución y control, saneamiento, preservación en calidad y cantidad suficiente del agua para lograr su desarrollo sustentable. En su artículo 9 expresa las atribuciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual es la institución que representa el poder federal en el ámbito del agua:

**Artículo 9.** *Son atribuciones de "la Comisión" en su Nivel Nacional, las siguientes:*

**XIII.** *Fomentar y apoyar los servicios públicos urbanos y rurales de agua potable, alcantarillado, saneamiento, recirculación y reúso en el territorio nacional, para lo cual se coordinará en lo conducente con los Gobiernos de los estados, y a través de éstos, con los municipios. Esto no afectará las disposiciones, facultades y responsabilidades municipales y estatales, en la coordinación y prestación de los servicios referidos;*

**XIV.** *Fomentar y apoyar el desarrollo de los sistemas de agua potable y alcantarillado; los de saneamiento, tratamiento y reúso de aguas; los de riego o drenaje y los de control de avenidas y protección contra inundaciones en los casos previstos en la fracción IX del presente Artículo; contratar, concesionar o descentralizar la prestación de los servicios que sean de su competencia o que así convenga con los*

*Gobiernos Estatales y, por conducto de éstos, con los Municipales, o con terceros;*

De las fracciones anteriores, se observa que el poder federal sí tiene la facultad de intervenir en el tema de tratamiento de agua, en coordinación con los órdenes locales de gobierno, ante lo cual los municipios sí están facultados, según se cita:

**Artículo 115.**

*V. Los Municipios, en los términos de las leyes federales y Estatales relativas, estarán facultados para:*

*i) Celebrar convenios para la administración y custodia de las zonas federales.*

De igual forma en dicho artículo constitucional, se establece que:

*III. Los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos siguientes:*

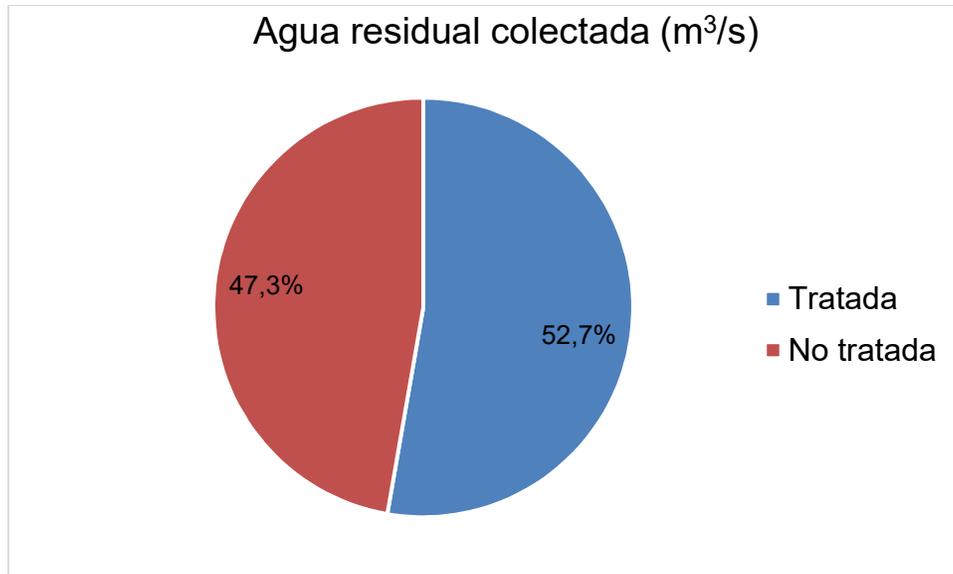
*a) Agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales;*

Es decir, la responsabilidad de efectuar el tratamiento de agua después de haber sido usada o aprovechada es municipal. Sin embargo, como ya se mencionó el agua es una materia concurrente por lo que tema del tratamiento de agua, constitucionalmente pueden actuar los tres órdenes de gobierno de manera conjunta y coordinada.

### **II.3.2.2 Situación actual**

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (2016), en su artículo 3°, fracción VI, se definen las aguas residuales como “aquellas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas”.

En la actualidad, en el país no se trata toda el agua que se utiliza en las actividades relacionadas con los seres humanos. De acuerdo con los datos más recientes de CONAGUA (2015), se colectan en el sistema de alcantarillado 211 m<sup>3</sup>/s, de los cuales reciben algún tipo de tratamiento 111 m<sup>3</sup>/s, es decir, el 52.7 % (Figura 13).



**Figura 13.- Agua residual tratada y no tratada**

Fuente: CONAGUA, 2015b

En la Tabla 2 se enlistan las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) municipal por RHA.

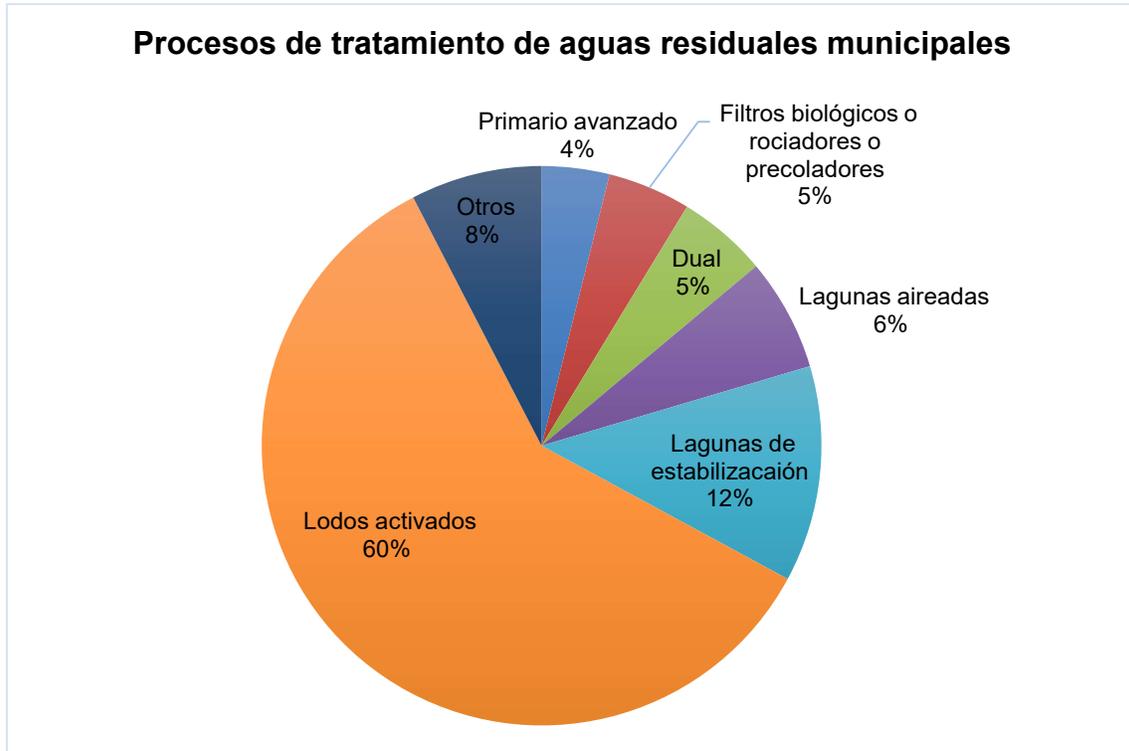
**Tabla 2.- PTAR en operación por RHA**

| Número de RHA | Número de plantas en operación | Capacidad instalada (m <sup>3</sup> /s) | Caudal tratado (m <sup>3</sup> /s) |
|---------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
| I             | 66                             | 9.86                                    | 6.87                               |
| II            | 101                            | 4.94                                    | 3.44                               |
| III           | 362                            | 10.26                                   | 7.88                               |
| IV            | 199                            | 9.89                                    | 7.54                               |
| V             | 94                             | 4.92                                    | 4.01                               |
| VI            | 225                            | 34.15                                   | 24.04                              |
| VII           | 151                            | 6.8                                     | 5.36                               |
| VIII          | 582                            | 39.84                                   | 30.52                              |
| IX            | 86                             | 5.53                                    | 4.16                               |
| X             | 137                            | 6.8                                     | 5.3                                |
| XI            | 114                            | 4.42                                    | 2.52                               |
| XII           | 81                             | 2.95                                    | 203                                |
| XIII          | 139                            | 11.54                                   | 7.58                               |
| <b>TOTAL</b>  | <b>2,337</b>                   | <b>151.9</b>                            | <b>111.25</b>                      |

Fuente: CONAGUA, 2015b

Del total de la infraestructura instalada, se observa que ninguna PTAR opera al 100% de su capacidad.

Se utilizan múltiples procesos de tratamiento en las PTAR, sin embargo, más de la mitad de las plantas instaladas son de lodos activados (Figura 14).

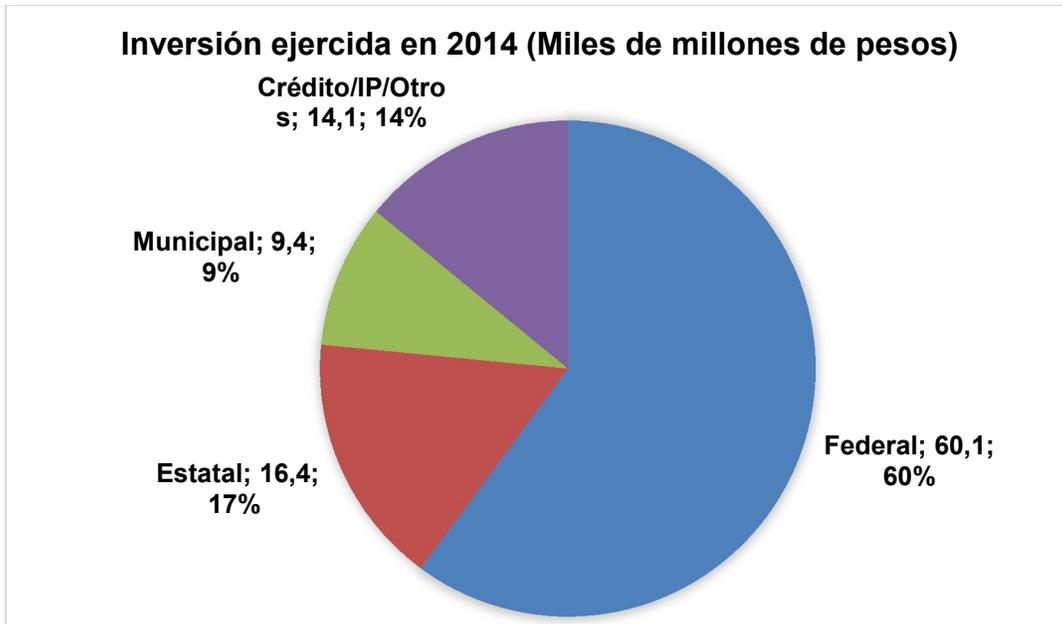


**Figura 14.- Procesos de tratamiento de las PTAR**  
Fuente: CONAGUA, 2015b

Los recursos financieros para la construcción de las PTAR principalmente provienen de fondos federales, a través de los programas de agua potable, alcantarillado y Saneamiento y tratamiento de aguas residuales (Figura 15).

En el área de estudio, la rehabilitación de la PLA, se realizó con los fondos federales provenientes del Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (PROSSAPYS), el cual es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). La ejecución de dicho Programa se realiza a través de los Estados y Municipios, las Comisiones Estatales de Agua Potable y Saneamiento, los organismos operadores municipales o el propio ayuntamiento (CONAGUA, 2015c).

El PROSSAPYS cuenta con tres componentes: 1) infraestructura, 2) atención social y participación comunitaria y 3) Desarrollo Institucional y Fortalecimiento a Ejecutores.



**Figura 15.- Origen de los recursos financieros para la instalación de PTAR**

Fuente: CONAGUA, 2015b

Los beneficios esperados resultado del PROSSAPYS, son apoyar la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento en comunidades rurales, promover la participación activa y representación social en las decisiones técnicas, organizativas y operativas de las soluciones de infraestructura, que los sistemas sean operados por las propias comunidades, para fomentar un proceso de descentralización tanto a nivel estatal como local y de este modo, se pretende el fortalecimiento de las capacidades locales y regionales para la planificación, realización y administración de los sistemas de agua potable y saneamiento rurales (CONAGUA, 2015c).

#### **II.4 Aspectos técnicos del tratamiento de agua**

En general, los objetivos del tratamiento de agua son la remoción de materia suspendida o flotante, el tratamiento de compuestos orgánicos biodegradables, la eliminación de organismos patógenos y recientemente la remoción de nutrientes se ha vuelto primordial para prevenir la eutroficación de cuerpos de agua (Metcalf y Eddy, 2014; Bilgin, Şimşek y Tulun, 2014).

Existen diversos tipos de agua residual, a grandes rasgos se puede dividir en municipal e industrial, la concentración de contaminantes del segundo tipo de agua dependerá del tipo de industria. Del agua residual municipal existen valores de referencia reportados en literatura internacional (Metcalf y Eddy, 2014), así como valores medidos para las ciudades de México y Guadalajara (Tabla 3).

Tabla 3.- Valores de contaminantes en agua residual municipal

| Parámetro               | Literatura internacional         | Ciudad de México | Guadalajara        |
|-------------------------|----------------------------------|------------------|--------------------|
| SDT (mg/L)              | 250-850                          | 1,447            | 931                |
| SST (mg/L)              | 100-350                          | 252              | 364                |
| SS (ml/L)               | 5-20                             | 2                | 3.7                |
| DBO (mg/L)              | 110-400                          | 219              | 282                |
| COT (mg/L)              | 80-290                           | Sin dato         | Sin dato           |
| DQO (mg/L)              | 250-1,000                        | 576              | 698                |
| NT (mg/L)               | 20-85                            | 35               | 52.8               |
| PT (mg/L)               | 4-15                             | 10               | 19                 |
| Grasas y aceites (mg/L) | 50-150                           | 58               | 156                |
| pH (unidades de pH)     | Sin dato                         | 7.88             | 7.3                |
| Conductividad eléctrica | Sin dato                         | 2,052            | 1,288              |
| Coliformes totales      | 10 <sup>6</sup> -10 <sup>9</sup> | 8.60E+07         | 2.24E+07 (fecales) |
| COV                     | <100->400                        | Sin dato         | Sin dato           |
| Huevos de helminto      | Sin dato                         | 161              | 58                 |

Fuente: CONAGUA, 2007a

Para remover los contaminantes en las aguas residuales (municipales o industriales), se requieren diversos procesos, los cuales se agrupan en tratamientos primarios, secundarios y terciarios (Metcalf y Eddy, 2014), en la Tabla 4 se describen los niveles de tratamiento:

Tabla 4.- Niveles de tratamiento del agua residual

| Nivel de tratamiento       | Descripción  |
|----------------------------|--|
| <b>Preliminar</b>          | Remoción de componentes grandes presentes en el agua residual, tales como pedazos de plástico, madera, arena, etc., que pueden causar problemas con la operación y mantenimiento del sistema |
| <b>Primario</b>            | Remoción de una porción de sólidos suspendidos y materia orgánica (medida como la demanda bioquímica de oxígeno, DBO)  |
| <b>Primario avanzado</b>   | Mejor remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica de las aguas residuales. Típicamente se logra mediante adición química o filtración.  |
| <b>Secundario</b>          | Remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos.  |
| <b>Secundario avanzado</b> | Remoción de compuestos orgánicos biodegradables, sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno y fósforo).   |
| <b>Terciario</b>           | Remoción de sólidos suspendidos totales, usualmente por medios filtrantes o membranas. La desinfección es parte de esta fase del tren de tratamiento.  |

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014

En la Tabla 5, se muestran los procesos unitarios que se utilizan típicamente de acuerdo a los contaminantes que se requieren remover del agua residual. Estos contaminantes se pueden clasificar en términos de sus propiedades físicas, químicas o biológicas (Tabla 6 a Tabla 9).

Para remover los contaminantes de agua, se diseñan trenes de tratamiento que contienen las etapas preliminar, primaria, secundaria o terciaria, según los parámetros de descarga a los que se requiere llevar el efluente del agua residual (Figura 16).

**Tabla 5.- Procesos unitarios típicamente utilizados según el contaminante a remover del agua residual**

| <b>Contaminante</b>                        | <b>Proceso unitario</b>   |
|--|---|
| <b>Sólidos suspendidos</b>                 | Cribado<br>Removedor de arena<br>Sedimentación y clarificación de alta tasa<br>Clarificación de alta velocidad<br>Flotación<br>Precipitación química con sedimentación, flotación o filtración<br>Filtración de profundidad<br>Filtración superficial<br>Filtración de membrana |
| <b>Compuestos orgánicos biodegradables</b> | Procesos aeróbicos y anaeróbicos<br>Sistemas físico-químicos<br>Oxidación química<br>Oxidación avanzada<br>Filtración de membrana   |
| <b>Fósforo</b>                             | Precipitación química<br>Remoción biológica   |
| <b>Nitrógeno y fósforo</b>                 | Remoción biológica  |
| <b>Sólidos disueltos</b>                   | Membranas<br>Tratamiento químico<br>Adsorción de carbono<br>Intercambio iónico  |
| <b>Compuestos orgánicos volátiles</b>      | Aireación extendida<br>Oxidación avanzada<br>Adsorción de carbono   |
| <b>Patógenos</b>                           | Dióxido de cloro<br>Hipoclorito de sodio<br>Ozono<br>Radiación ultravioleta<br>Pasteurización   |
| <b>Olores</b>                              | Depuradores químicos<br>Biofiltros  |

**Fuente: Metcalf y Eddy, 2014**

Tabla 6.- Parámetros físicos del agua residual

| Contaminante                        | Abreviatura               | Unidad                              | Significado en aguas residuales   |
|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---|
| Sólidos totales                     | ST                        | mg/L                                | Evaluar el potencial de reutilización de las aguas residuales y determinar el tipo de operaciones y procesos más adecuados para su tratamiento. |
| Sólidos volátiles totales           | SVT                       | mg/L                                |   |
| Sólidos disueltos totales           | SDT                       | mg/L                                |   |
| Sólidos suspendidos volátiles       | SSV                       | mg/L                                |   |
| Sólidos sedimentables               | SS                        | mg/L                                |   |
| Sólidos sedimentables totales       | SST                       | mg/L                                |   |
| Tamaño de partícula                 | TP                        | mg/L                                | Evaluar el comportamiento del proceso de desinfección del agua.   |
| Distribución de tamaño de partícula | DTP                       | mg/L                                | Evaluar el comportamiento del proceso de tratamiento.   |
| Turbidez                            | NTU                       | Unidades nefalométricas de turbidez | Se utiliza para evaluar la calidad del agua residual tratada.   |
| Color                               | Gris, negro, transparente | Pt-Co                               | Evaluar la calidad del agua (residual o potable).   |
| Olor                                |                           | Índice de intensidad de olor        | Determinar si existiera un problema con la calidad del agua.  |
| Temperatura                         | T                         | °C                                  | Es un parámetro importante en el caso del diseño y operación de procesos biológicos.  |
| Conductividad                       | CE                        | μS/cm <sup>2</sup>                  | Se utiliza para evaluar el efluente tratado para fines agrícolas.   |

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014

Tabla 7.- Características químicas inorgánicas

| Contaminante              | Abreviatura  | Unidad         | Significado en aguas residuales   |
|---------------------------|--|----------------|---|
| <b>Amoniaco</b>           | NH <sub>3</sub>  | mg/L           | Se utiliza como medida de los nutrientes presentes y el grado de descomposición en el agua (las formas oxidadas son indicador del grado de oxidación) |
| <b>Ion amonio</b>         | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | mg/L           |   |
| <b>Nitritos</b>           | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | mg/L           |   |
| <b>Nitratos</b>           | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | mg/L           |   |
| <b>Nitrógeno orgánico</b> | Org N  | mg/L           |   |
| <b>Fósforo inorgánico</b> | Inorg P  | mg/L           |   |
| <b>Ortofosfatos</b>       | PO <sub>3</sub> <sup>4-</sup>  | mg/L           |   |
| <b>Fósforo orgánico</b>   | Org P  | mg/L           |   |
| <b>pH</b>                 | -log [H <sup>+</sup> ]   | Unidades de pH | Mide la acidez o basicidad del agua residual  |
| <b>Alcalinidad</b>        | Suma de carbonatos   | mg CaCo3       | Medida de la capacidad buffer del agua residual   |
| <b>Cloruros</b>           | Cl <sup>-</sup>  | mg/L           | Se utiliza para evaluar el agua residual para fines agrícolas   |
| <b>Sulfatos</b>           | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>  | mg/L           | Evaluar el potencial de formación de olores, puede impactar en la disposición de los lodos residuales   |
| <b>Metales</b>            | As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na, Zn                                 | mg/L           | Evalúa la calidad del agua para reúso y efectos tóxicos que podría tener. Algunos componentes traza pueden impactar en los tratamientos biológicos    |
| <b>Gases</b>              | O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub> | mg/L           | Evalúa la calidad del agua al indicar presencia o ausencia de alguno de estos gases   |

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014

**Tabla 8.- Características químicas orgánicas**

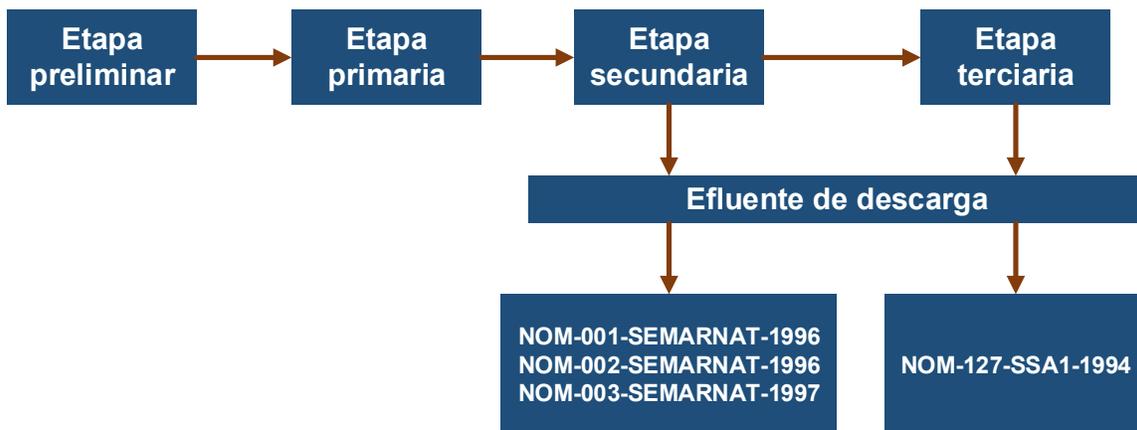
| Contaminante                                  | Abreviatura      | Unidad | Significado en aguas residuales   |
|---|------------------|--------|---|
| <b>Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días</b> | DBO <sub>5</sub> | mg/L   | Mide la cantidad de oxígeno que requiere el agua residual para estabilizarse biológicamente en un periodo de 5 días |
| <b>Demanda química de oxígeno</b>             | DQO              | mg/L   | Mide la cantidad de oxígeno que requiere el agua residual para oxidar la materia orgánica                           |
| <b>Carbono orgánico total</b>                 | COT              | mg/L   | Frecuentemente se utiliza como sustituto de la prueba de DBO <sub>5</sub>   |
| <b>Compuestos orgánicos específicos</b>       |                  |        | Determina la presencia de compuestos orgánicos específicos  |

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014

**Tabla 9.- Características biológicas**

| Contaminante                       | Abreviatura / unidad                      | Significado en aguas residuales   |
|------------------------------------|---|---|
| <b>Coliformes</b>                  | Número más probable de colonias (NMP)     | Evalúa la presencia potencial de organismos patógenos y da pauta para el diseño de los procesos de desinfección |
| <b>Microorganismos específicos</b> | Bacterias, protozoarios, helmintos, virus | Evaluar la presencia de organismos específicos en relación con Operación de la planta y para su reutilización   |
| <b>Toxicidad</b>                   | Unidades tóxicas (UT)                     | Evalúa la toxicidad aguda y crónica del agua residual   |

Fuente: Metcalf y Eddy, 2014



**Figura 16.- Tren de tratamiento según calidad requerida del efluente**

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 16, los trenes de tratamiento se diseñan según los requerimientos de la descarga, los cuales dependen del uso posterior que se le dará al agua, en México estos parámetros de descarga están regulados por las normas oficiales mexicanas (NOM's), las cuales tienen un carácter de cumplimiento obligatorio, en caso de tener permiso de descarga a cuerpos de agua nacionales, alcantarillado o reusar el agua en otros procesos, así como la potabilización del agua.

En la Tabla 10, se muestran las NOM's relacionadas con el tratamiento de agua y en el anexo 2 los parámetros que se requieren cumplir en caso de descarga a cuerpos de agua nacionales.

**Tabla 10.- Normas oficiales mexicanas relacionadas con el tratamiento de agua en el país**

| <b>Norma</b>                 | <b>Nombre</b>  | <b>Fecha de emisión</b>  |
|------------------------------|--|--------------------------|
| <b>NOM-001-SEMARNAT-1996</b> | Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.                        | 24 de diciembre de 1996  |
| <b>NOM-002-SEMARNAT-1996</b> | Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. | 18 de octubre de 1993    |
| <b>NOM-003-SEMARNAT-1997</b> | Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.                 | 21 de septiembre de 1998 |
| <b>NOM-127-SSA1-1994</b>     | Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.       | 14 de agosto de 1998     |

Fuente: SEMARNAT, 2012

#### **II.4.1 Plantas de tratamiento de lodos activados**

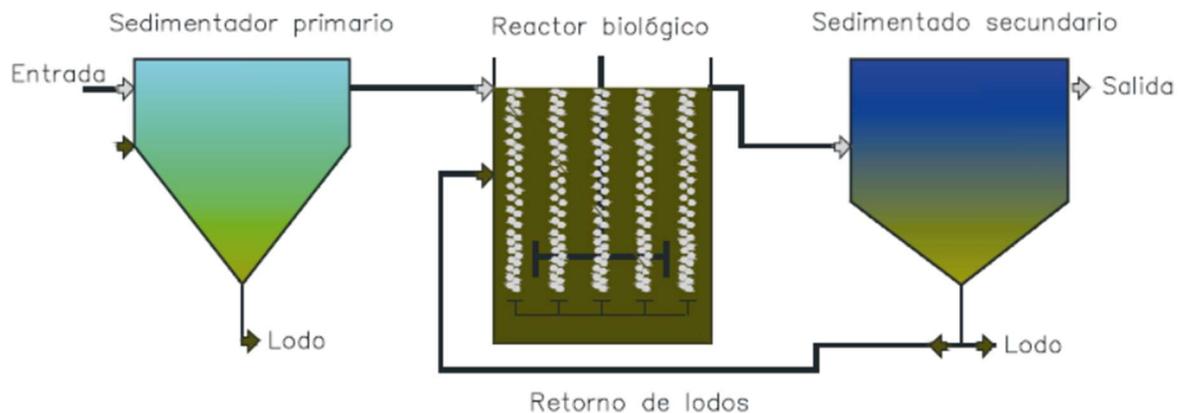
El proceso de tratamiento más comúnmente empleado es el de lodos activados, el cual se ha sido utilizado para el tratamiento de aguas residuales ricas en materia orgánica, emplea suspensiones de cultivos microbianos mixtos crecidos en biorreactores para degradar los contaminantes. El objetivo de este tipo de sistemas, es oxidar la materia orgánica biodegradable, transformándola en biomasa microbiana y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un tanque aireado, luego se flocculan y

separan los biosólidos recién formados en un clarificador. En el proceso de floculación las bacterias y otras partículas en suspensión se agrupan en masas más grandes llamadas flóculos (Graham y Smith, 2004). En la Figura 17, se presenta el esquema de un proceso de mezclado completo de lodos activados.

Un proceso secundario de lodos activados no remueve significativamente nitrógeno ni fósforo en las aguas residuales, por lo que no resulta eficiente para prevenir la eutroficación de los cuerpos de agua (Bilgin *et al.*, 2014).

El tratamiento de aguas residuales utilizando esta tecnología de forma convencional requiere de largo tiempo de residencia de los lodos para efectuar la nitrificación y aún existe dificultad en la eliminación casi completa del nitrógeno, por ello comúnmente después de este sistema se utilizan otros procesos tales como microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa, sin embargo, dichos procesos son muy caros y requieren de operadores altamente especializados (Badejo, Omole, Ndambuki, y Kupolati, 2017).

Estos sistemas consumen relativamente altas cantidades de energía, debido principalmente al suministro de oxígeno, del cual su demanda está determinada por la cantidad de materia orgánica a remover y la masa de lodos activados en el reactor (CONAGUA, 2007b).



**Figura 17.- Proceso de lodos activados (mezclado completo)**

Fuente: CONAGUA, s.f.

## II.4.2 Los humedales artificiales: ecotecnología de tratamiento de agua

### II.4.2.1 Descripción

En el artículo tercero fracción XXX de la Ley de Aguas Nacionales, se establece que los humedales son:

*Humedales: Las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos*

Los humedales artificiales (HA) son sistemas diseñados para proveerlos de capacidad de tratamiento de agua, simulando los ecosistemas naturales (Kadlec y Wallace, 2009). Son una tecnología de bajo costo de operación y mantenimiento, y alto potencial para tratamiento del agua en los países en desarrollo (Kivaisi, 2001).

La Figura 18 muestra el esquema de un humedal artificial, en estos sistemas, el componente vegetal y los medios de soporte son factores decisivos en el rendimiento de remoción de los contaminantes, ya que se considera que son sus principales componentes biológicos y cambian directa o indirectamente los procesos primarios de eliminación de contaminantes a través del tiempo, además su buen desempeño también depende de forma crítica de los parámetros operativos óptimos tales como: profundidad del agua, tiempo y carga de retención hidráulica, modo de alimentación y diseño de las configuraciones, por lo que podrían existir variaciones en la eficiencia de eliminación de los diversos contaminantes (Kadlec y Wallace, 2009).

Los principales mecanismos de eliminación de contaminantes que se efectúan en los humedales artificiales son de tipo biológicos, físicos y químicos, tales como sedimentación, filtración, precipitación, volatilización, adsorción y diversos procesos microbianos, los cuales son influenciados directa e indirectamente por las diferentes condiciones ambientales internas y externas tales como temperatura, disponibilidad de oxígeno disuelto y fuente de carbono orgánico, estrategias de operación, condiciones de óxido-reducción (redox), pH, humedad, entre otros (Wu, *et al.*, 2015). En la Figura 19 se esquematizan los procesos involucrados en la remoción de contaminantes del agua.

Sus principales ventajas son sus bajos costos de operación, fácil operación y mantenimiento, por lo que han sido utilizados como sistema de tratamiento de un amplia gama de tipos de agua, tales como efluentes industriales, aguas residuales municipales, aguas residuales producto de la agricultura y acuacultura, agua proveniente de minería, aguas contaminadas de ríos, entre otras. También son considerados como una tecnología adecuada para ser utilizada en espacios urbanos y rurales (Liu, Zhao, Doherty, Hu y Hao, 2015).

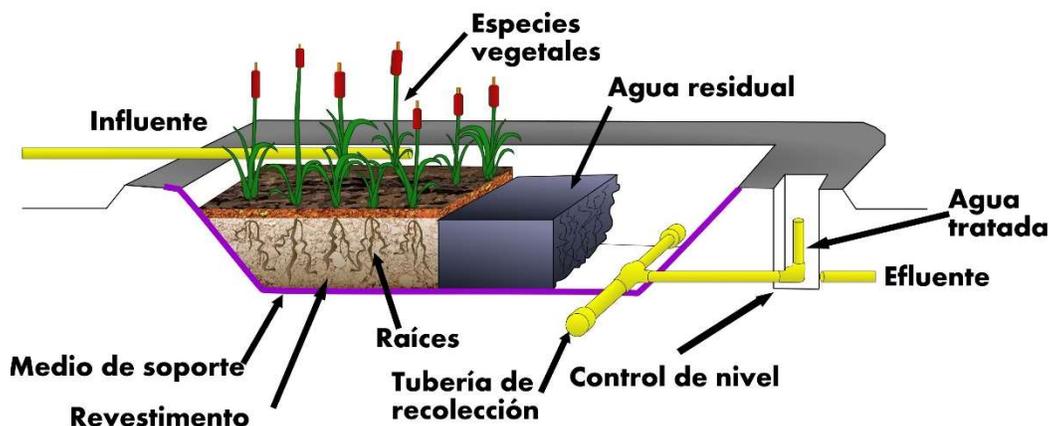


Figura 18.- Esquema de un humedal artificial (HA)

Fuente: Tomado y adaptado de Luna-Pabello, 2014

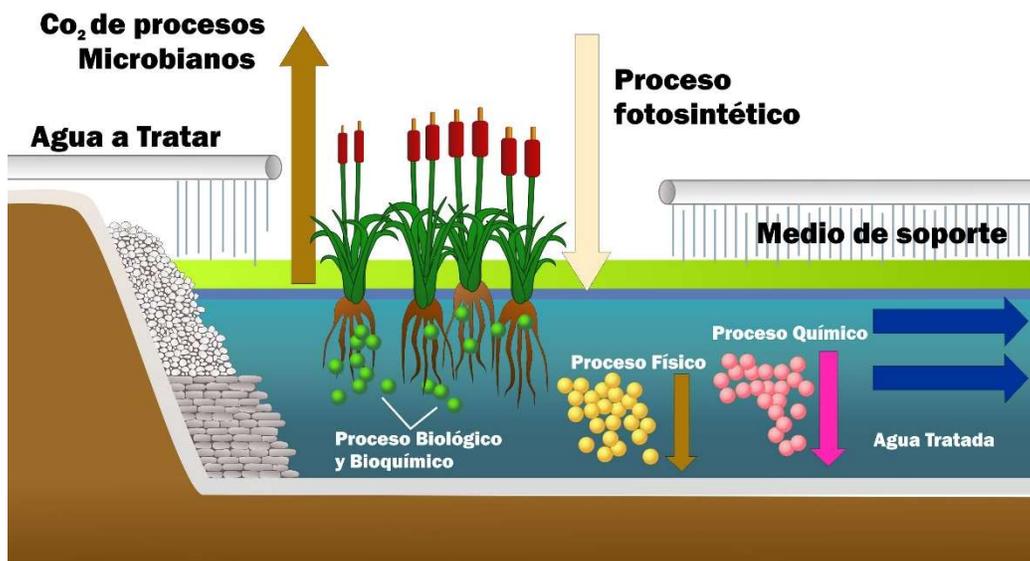


Figura 19.- Principales procesos efectuados por los HA para la remoción de contaminantes del agua

Fuente: Tomado y adaptado de Luna-Pabello, 2014

La principal desventaja de los humedales artificiales es el área que requieren, así como la probable obstrucción del medio de soporte, cuando el agua residual tiene una alta carga de compuestos orgánicos y sólidos suspendidos, además dependiendo de la tasa de transferencia de oxígeno, los procesos de desnitrificación pueden verse limitados, de igual forma, algunos contaminantes recalcitrantes y metales pesados pueden limitar el desempeño de estos sistemas (Liu, Zhao, Doherty, Hu y Hao, 2015).

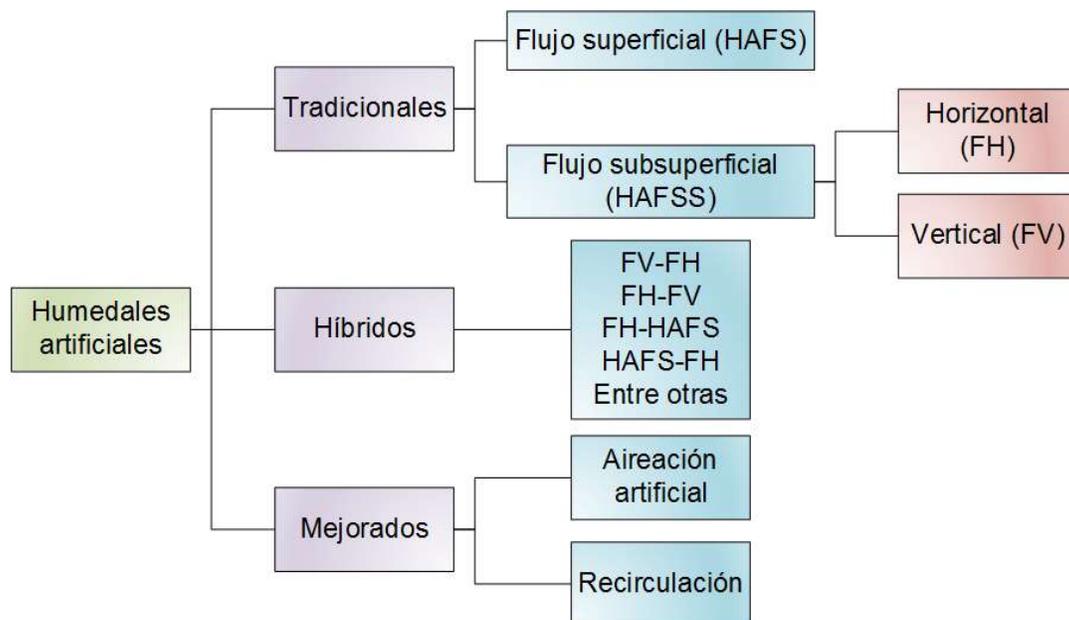
### II.4.2.2 Clasificación

Los HA típicamente se clasifican de acuerdo con su hidrología en dos tipos (Kadlec y Wallace, 2009):

Flujo superficial (HAFS): Son similares a los humedales naturales, con un flujo superficial de aguas residuales sobre el sustrato saturado.

Flujo subsuperficial (HAFSS): El agua residual fluye horizontal o verticalmente a través del sustrato que soporta el crecimiento de las plantas, en esta configuración el agua tratada no queda expuesta al ambiente. De acuerdo con la dirección del flujo de agua, pueden a su vez dividirse en horizontales y verticales.

Existen diversas combinaciones que pueden diseñarse según los contaminantes del agua residual que se requieren remover, a este tipo de diseños se les conoce como híbridos. En la Figura 20 se muestra un esquema de la clasificación de los HA.



**Figura 20.- Clasificación de los HA**  
Fuente: Tomado y adaptado de Wu, *et al.*, 2015

### II.4.2.3 Costos asociados

Los costos asociados a los humedales artificiales, se pueden dividir en costos directos (inversión inicial) y costos de operación y mantenimiento.

#### Costos directos

Los costos directos están relacionados con los siguientes rubros (Kadlec y Wallace, 2009):

- Terreno: el área que utilizan los humedales es considerablemente mayor que otras tecnologías de tratamiento, el costo del terreno depende del sitio en el que se pretenda construir.
- Investigación y diseño de ingeniería: el diseño debe considerar los factores topográficos, el tipo de suelo, nivel de agua freática, entre otros, para ello se requiere la realización de los estudios pertinentes.
- Terraplenes (según el diseño de ingeniería): depende de las condiciones del lugar
- Revestimientos: depende del diseño de ingeniería, la regulación ambiental, factibilidad técnica. El revestimiento puede ser de geomembrana (de varios tipos de polímeros), revestimiento de arcillas, incluso existen humedales sin revestimiento.
- Especies vegetales: el costo de las especies vegetales depende si los componentes se compran o se propagan en un invernadero. Se recomienda que la vegetación sea nativa del sitio en el que se instalará el humedal.
- Estructuras de control de agua y tuberías: este costo depende del diseño de ingeniería (tamaño y complejidad de las estructuras). En este rubro se incluyen tuberías, accesorios, bombas, equipo de control y material eléctrico.
- Trabajo en sitio (preparación del sitio, cercado, caminos de acceso): el costo incluye la construcción civil y de rutas de acceso, instalación eléctrica, instalación de tuberías y accesorios, sembrado de plantas, entre otros.
- Instalaciones de uso de los trabajadores: el costo de las instalaciones que se pondrán para uso de los trabajadores (sanitarios, disposición de residuos, entre otros).

## **Costos de operación y mantenimiento**

Los costos de operación están compuestos por el costo de la energía eléctrica (si el sistema utiliza bombas, equipo de control, luminarias), el monitoreo de la calidad del agua a la salida del sistema, así como el mantenimiento de la vegetación (generalmente se poda la vegetación a cierta altura o se remueve del sistema, según el tipo del que se trate)

### **II.4.2.4 Servicios ambientales de los humedales artificiales**

El Millennium Ecosystem Assessment (MEA), define los servicios ambientales o ecosistémicos como aquellos que prestan los ecosistemas en beneficio de las personas. Estos beneficios contemplan servicios de suministro (tales como alimentos y el agua), servicios de regulación (por ejemplo regulación de inundaciones, sequías, la degradación del suelo y las enfermedades), servicios de base (como la formación del suelo y los ciclos de los nutrientes), y servicios culturales (tales como beneficios recreacionales, espirituales, religiosos) y otros beneficios intangibles (MEA, 2003).

En resumen, tal como lo indican Balvanera y Cotler (2007), “los servicios ecosistémicos o servicios ambientales permiten hacer un vínculo explícito entre el estado y funcionamiento de los ecosistemas y bienestar humano. Está relación puede ser directa o indirecta, y los seres humanos pueden o no estar conscientes de su existencia”.

En el caso de los humedales naturales, se considera que proveen una serie de servicios ambientales, tales como mejora de la recarga de agua subterránea, retención de nutrientes y contaminantes químicos, purificación de agua, formación de suelo, control de la erosión y sedimentación, potencial para controlar las inundaciones y aumentar su periodo de retorno, aumentar los caudales bajos y reducir las escorrentías, servicios recreativos y culturales así como hábitat para una amplia variedad de fauna (Kadykalo y Findlay, 2016; Zhang, Shi, Liu y Xu, 2017).

Los humedales artificiales proveen de casi los mismos servicios ambientales que los humedales naturales, tales como tratamiento de agua, hábitat de diversas aves migratorias, servicios culturales para las comunidades aledañas, entre otros (Ghermandi y Fichtman, 2015).

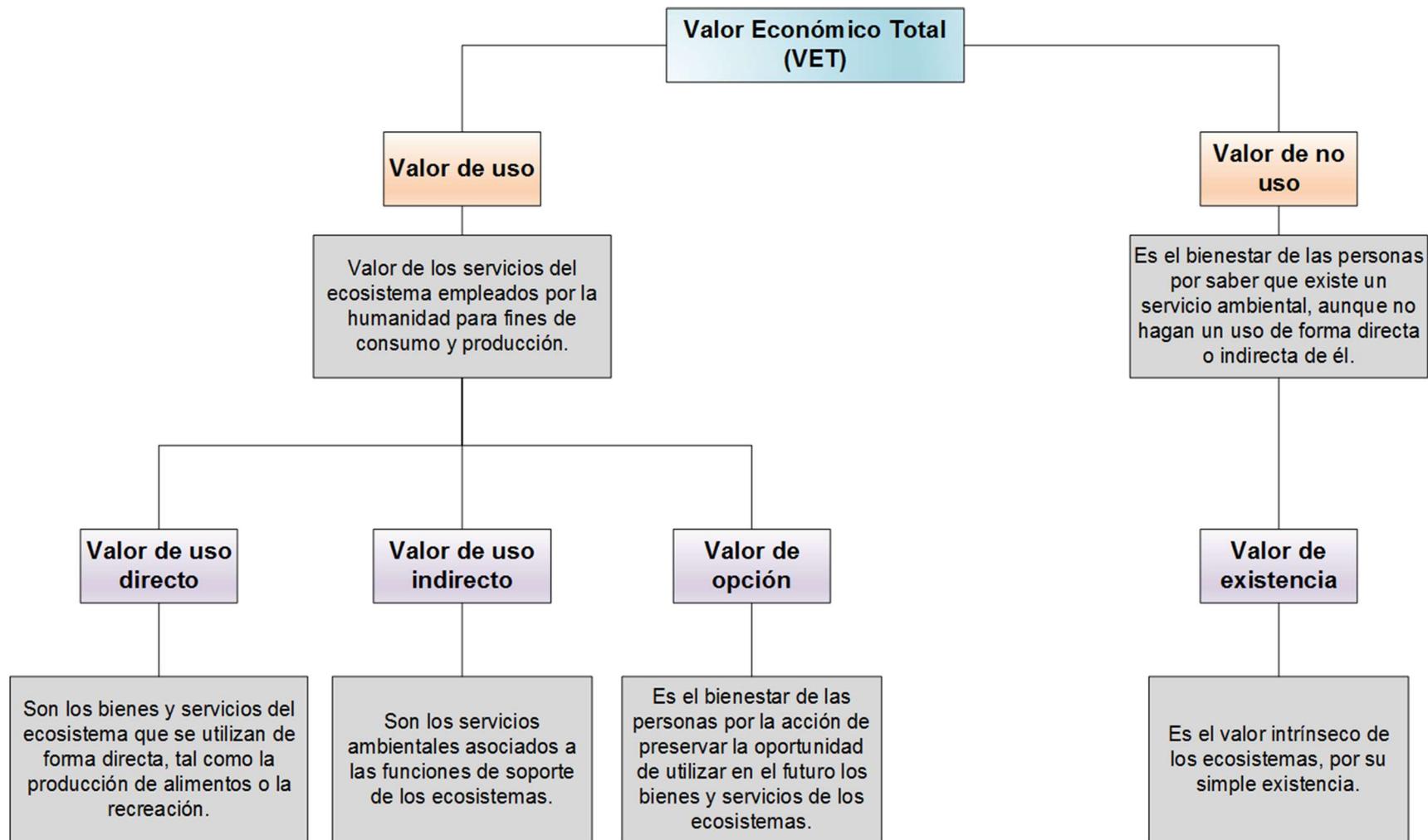
Los servicios de los humedales artificiales difieren esencialmente en que es posible maximizar su valor de uso directo, por ejemplo, en la producción de alimentos,

utilización en la recreación y el tratamiento de agua (Yang, Chang, Xu, Peng y Ge, 2008).

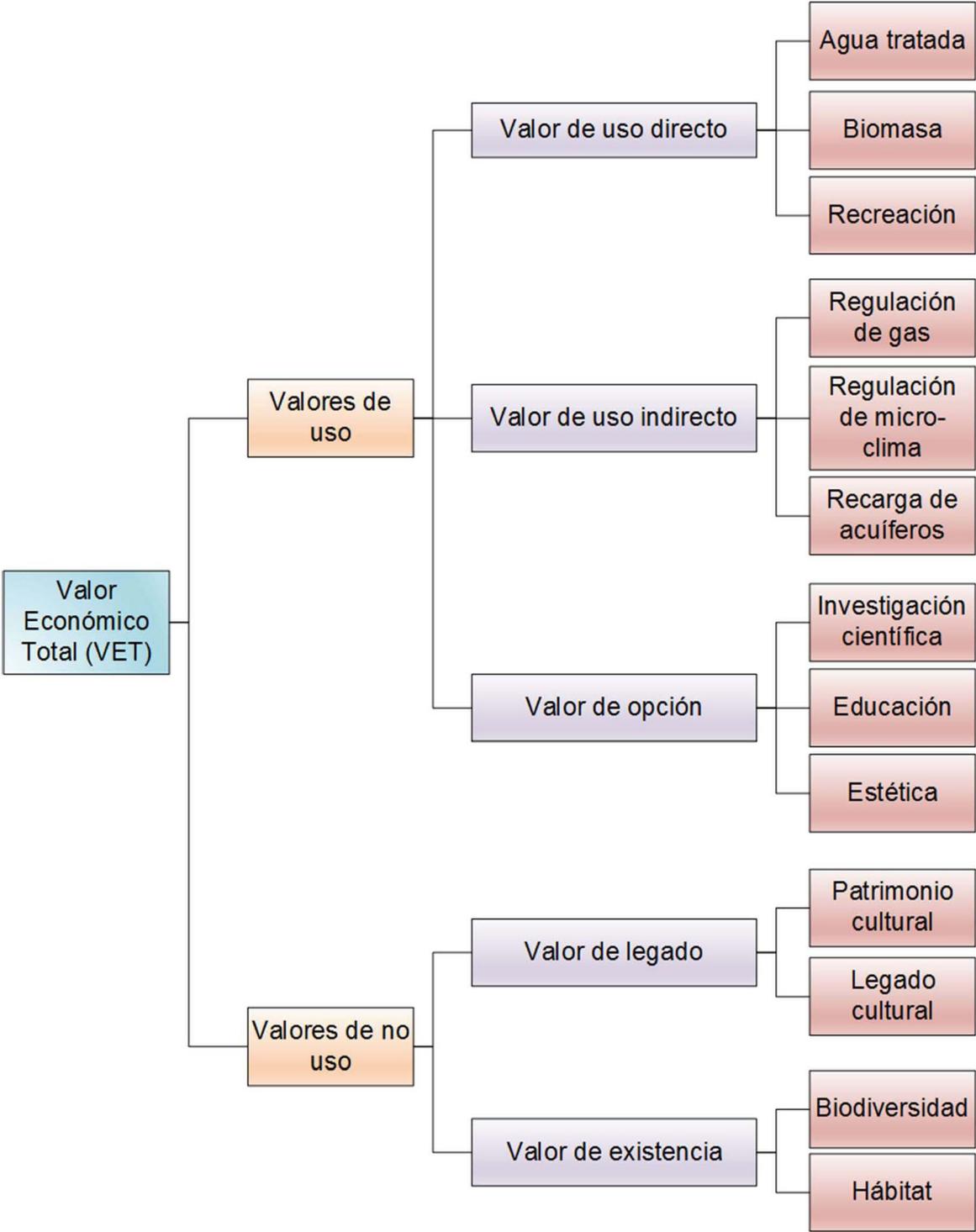
El MEA, en su informe a la Convención de Ramsar, estima que el valor de los humedales y de los servicios de sus ecosistemas asociados es de 14 billones de dólares anuales (RAMSAR- CONANP, s.f.). Es necesario tener en cuenta que la valoración económica y financiera no es una panacea, es sólo un punto de partida, cuando se hace referencia a la brecha de la valoración de los servicios ecosistémicos construidos, para ofrecer una herramienta a los tomadores de decisiones y sensibilizar al público sobre los valores que los servicios ecosistémicos proporcionan (Yang *et al.*, 2008).

Para realizar la valoración de los servicios ambientales, se ha propuesto el término Valor Económico Total (VET), en el que se considera que los bienes y servicios ambientales pueden poseer un valor desigual para diversos individuos o grupo de personas. El VET se compone del valor de uso (VU) y valor de no uso (VNU), a su vez el VS está conformado por el valor de uso directo, valor de uso indirecto y valor de opción (Cristeche y Penna, 2008). En la Figura 21 se muestra con mayor detalle la composición del VET.

Yang, *et al.*, (2008), han propuesto un sistema ecológico-económico de los servicios que prestan los humedales artificiales que tratan agua eutrófica, en la que consideran diversos servicios ambientales (Figura 22).



**Figura 21.- Composición del VET**  
Fuente: Elaborado con base en Cristeche y Penna, 2008



**Figura 22.- Valor económico total (VET) de la construcción de humedales artificiales**

Fuente: Tomado de Yang *et al.*, 2008

## II.5 Eutroficación de los cuerpos de agua

La eutroficación de ríos y lagos es uno de los mayores problemas ambientales actuales, la causa primordial es el enriquecimiento de dichos cuerpos de agua con nutrientes, esencialmente nitrógeno (N) y fósforo (P), provenientes de actividades antropogénicas (Jones, Willis, Gough y Freeman, 2017).

El proceso de eutroficación de los cuerpos de agua se efectúa de manera natural a lo largo de miles de años, sin embargo, durante las últimas décadas la alteración de los ciclos biogeoquímicos y bioquímicos de los nutrientes por los seres humanos ha causado que este proceso se acelere (Smith, Tilman y Nekola, 1999).

Los compuestos de nitrógeno y fósforo, de forma natural están presentes en bajas concentraciones en los cuerpos de agua, ya que su presencia es de vital importancia, puesto que son nutrientes esenciales para la vida. Un exceso de estos nutrientes produce un crecimiento de macrófitas (formas macroscópicas de vegetación acuática) y fitoplancton (cianobacterias o algas verde-azules, algunas de estas especies pueden ser tóxicas), dichos organismos impiden el paso de la luz a capas inferiores del cuerpo de agua, reducción de la calidad del agua y pérdida de biodiversidad de la ictiofauna (Doménech, 1998; Jones *et al.*, 2017).

De la misma forma, otras consecuencias de la eutroficación de lagos y ríos van desde el punto de vista estético hasta el aumento de la biomasa y cambios en la composición de especies de algas, reducción de la claridad del agua, problemas de sabor y olor, interferencia en los procesos de floculación y cloración en el tratamiento del agua, restricción de la natación y otras actividades recreativas acuáticas o pesca con fines económicos (Smith *et al.*, 1999).

El incremento de N en los cuerpos de agua se debe principalmente al uso indiscriminado de fertilizantes en la agricultura, el de P al aumento de detergentes (Jones *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 1999). El ciclo del P, es el que domina el proceso de eutroficación, puesto que es el elemento limitante en los sistemas acuáticos (Ekholm y Lehtoranta, 2012).

El ciclo de P es en su mayoría geoquímico, sin embargo, cuando el elemento ingresa a los cuerpos de agua (por arrastre en erosión de los suelos) su biodisponibilidad está dada principalmente por reacciones de mineralización debido a la reducción parcial o completa de los óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), por lo que éste compuesto también juega un rol clave en la eutroficación (Ekholm y Lehtoranta, 2012)

Además del incremento de la carga de nutrientes en ríos y lagos, los seres humanos modifican los flujos fluviales de nutrientes mediante la construcción de presas. El cierre de la presa convierte el tramo aguas arriba de un canal fluvial en un embalse. El tiempo de residencia hidráulico se hace más largo y el consiguiente descenso de la velocidad y turbidez del flujo promueven la productividad primaria y el ciclo de nutrientes dentro del depósito, de esa forma las presas pueden alterar los ciclos de nutrientes de las cuencas hidrográficas de múltiples y complejas formas (Van Cappellen y Maavara, 2016).

En la Figura 23, se muestra de forma esquemática los procesos y ciclos de nutrientes que se efectúan en un embalse.

Debido a la complejidad de variables que contribuyen en el proceso de eutroficación de los lagos, Janus y Vollenweider (1981) propusieron una clasificación de sus niveles tróficos de acuerdo con ciertas características que pueden ser medidas (Tabla 11).

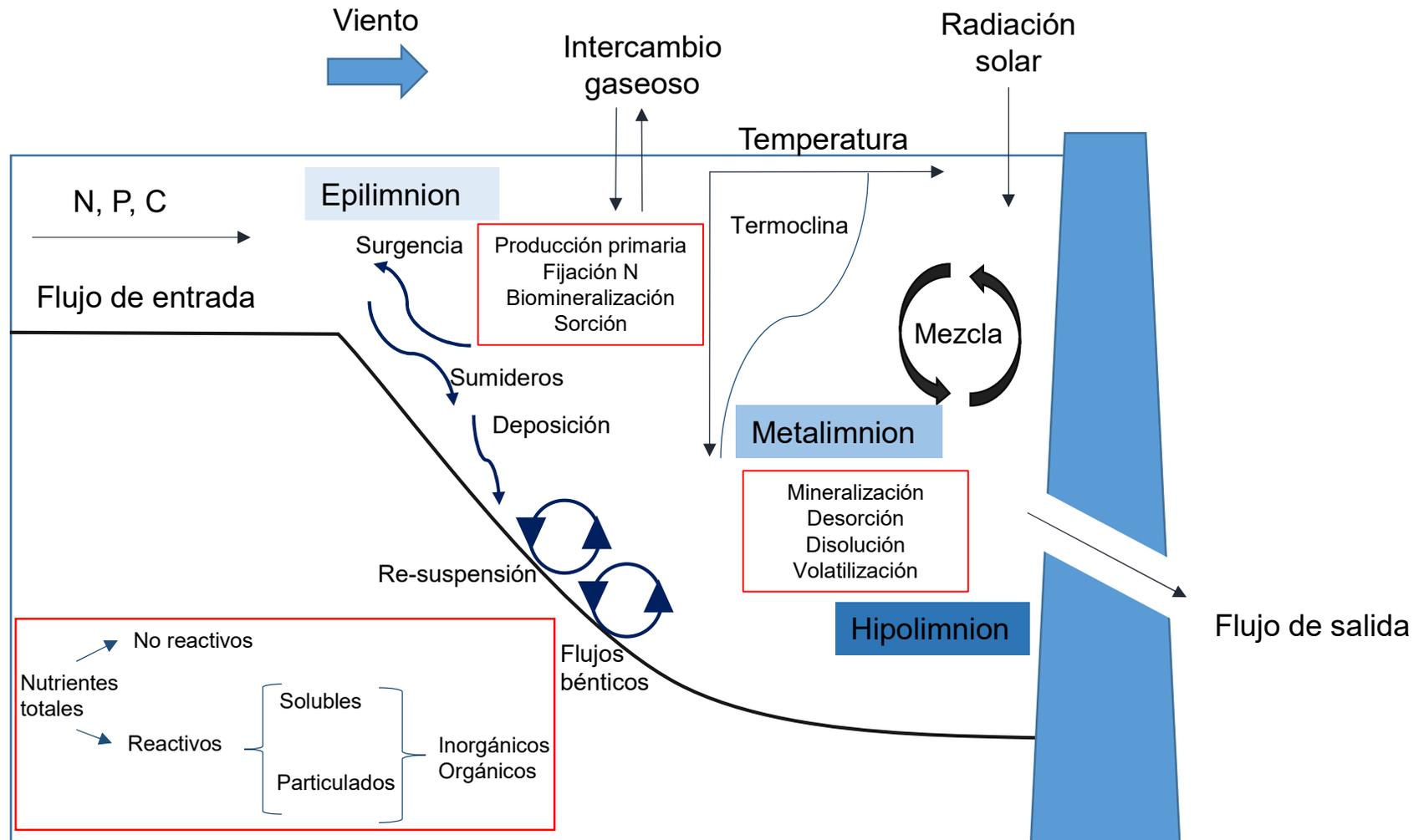
**Tabla 11.- Clasificación de los niveles tróficos de los lagos de acuerdo con variables que pueden ser medidas en los mismos**

| Estado trófico      | Materia orgánica  | Promedio total de fósforo | Máximo de clorofila | Profundidad de Secchi <sup>a</sup> |
|---------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|------------------------------------|
|                     | mg/m <sup>3</sup> | mg/m <sup>3</sup>         | mg/m <sup>3</sup>   | m                                  |
| <b>Oligotrófico</b> | Bajo              | 8,0                       | 4,2                 | 9,9                                |
| <b>Mesotrófico</b>  | Medio             | 26,7                      | 16,1                | 4,2                                |
| <b>Eutrófico</b>    | Alto              | 84,4                      | 42,6                | 2,45                               |
| <b>Hipertrófico</b> | Muy alto          | 750-1200                  |                     | 0,4-0,5                            |

Fuente: Janus y Vollenweider, 1981

<sup>a</sup> : Sistema que permite medir la turbidez de la columna de agua en un lago

En la presa Valle de Bravo se han reportado florecimientos de cianobacterias desde el año 1998 (Ramírez, Martínez, Martínez y Eslava, 2004) y se encuentra clasificada en estado eutrófico (Pérez, Espinosa, Islas, Zarco y Mazari-Hiriart, 2016).



**Figura 23.- Diagrama de procesos que controlan el ciclo y la retención de nutrientes en un embalse**  
 Fuente: Tomado y adaptado de Van Cappellen y Maavara, 2016

### **II.5.1 Propuestas para enfrentar la eutroficación de cuerpos de agua**

Experiencias previas de éxito en la gestión y el control de la eutroficación se basan principalmente en la restricción de los aportes de nutrientes al cuerpo de agua (Smith *et al.*, 1999). Uno de los principales aportes de nutrientes a ríos y lagos es el arrastre en sedimentos productos de la erosión de los suelos (Ekholm y Lehtoranta, 2012).

Algunas acciones que se han realizado en el mejoramiento de lagos suecos incluyen aireación del hipolimnion (sin perturbar la estratificación), extracción del sedimento y de vegetación y regular el nuevo desarrollo de la nueva vegetación del litoral (Margalef, 1983).

Otra propuesta es el tratamiento del agua de ríos y lagos para disminuir la contaminación antropogénica, para ello se requiere elegir con mucho cuidado la tecnología de tratamiento, teniendo en cuenta algunos parámetros tales como: la concentración de fósforo, la temperatura, el contenido de oxígeno del agua de entrada, la morfometría del lago, entre otros (Dunalska y Wiśniewski, 2016).

De igual forma el control del ingreso de fósforo a los cuerpos de agua lénticos, puede ser disminuida mediante la mejora de las instalaciones existentes de tratamiento de agua, introduciendo la etapa de precipitación y floculación o ajustando el tratamiento biológico tendiente a eliminar el aumento del fósforo (Bauzá y Giannuzzi, 2011).

Lo anterior son acciones técnicas, sin embargo, debido a que la eutrofización es una variable de respuesta integral afectada por el proceso climático, la geografía regional, las características geológicas de los lagos y las actividades humanas es necesario diseñar una estrategia integral en la que exista comunicación entre los investigadores y los administradores del agua, evaluar el riesgo del fenómeno e implementar un plan de gestión que involucre medidas de mitigación, monitoreo constante, planes de acción y contingencia, así como información y participación de los distintos sectores involucrados en el uso del recurso hídrico (Yang, Wu y Gao, 2016; Adrinolo y Ruiz, 2011).

## **II.6 Factibilidad de utilización de humedales artificiales con otras tecnologías y opción viable ante la eutroficación**

Como ya se describió, las principales ventajas de los humedales artificiales son los bajos costos de operación y su fácil operación y mantenimiento, adicionalmente algunos estudios han demostrado su potencial para remover nitrógeno y fósforo del agua residual, lo que ha reducido el crecimiento de fitoplancton (Jones *et al.*, 2017).

De igual forma, su utilización en el tratamiento del agua, ha demostrado ser una alternativa económica para la remoción de nitrógeno y fósforo en el efluente de un tratamiento secundario, tal como el de lodos activados (Bilgin *et al.*, 2014).

En ese sentido, la combinación o integración de los humedales artificiales con otros procesos de tratamiento de aguas residuales, ha alcanzado muy buen desempeño, debido a que se busca maximizar las ventajas de cada tecnología (Liu, Zhao, Doherty, Hu y Hao, 2015). Sin embargo, para realizar la integración con un proceso de lodos activados todavía no hay suficientes pruebas, excepto como una etapa de pulido final que opera en serie (Liu *et al.*, 2015).

El sistema de lodos activados sigue siendo la tecnología más empleada en el tratamiento de aguas residuales, pero también necesita ser actualizado para cumplir con los estándares normativos de los efluentes, integrarles humedales artificiales tiene el potencial de mejorar el proceso y merece exploración. Además, también se necesitan investigaciones y mejoras futuras para proponer combinaciones óptimas para aguas residuales específicas a fin de maximizar las ventajas de los humedales artificiales (Liu *et al.*, 2015).

En el problema de la eutroficación, los humedales artificiales son una opción viable para mitigarlo, desde la retención de nutrientes y su uso en la producción de alimentos y fibras hasta la provisión de servicios ecosistémicos (Franzén, Dinnétz, y Hammer, 2016).

Por lo anterior, en el presente trabajo se propone la utilización de HA como apoyo a la PLA ya instalada (con operación deficiente), con el objetivo de remover los contaminantes que ésta última no logra depurar en el agua que se vierte al río.

### III DISEÑO METODOLÓGICO

Para responder a las preguntas de investigación es necesaria la utilización de diversas metodologías, ya que estas son de diversa naturaleza, en la Tabla 12 se muestra una síntesis de la metodología utilizada por pregunta de investigación.

En la Figura 24, se muestra la conceptualización de la metodología.

**Tabla 12.- Descripción de la metodología de acuerdo con el carácter de las preguntas de investigación**

| Pregunta  | Metodología:<br>método                          | Técnica de<br>producción de datos   |
|---|---|---|
| 2. ¿Cuál es la percepción de los habitantes de Amanalco de Becerra respecto al río y su uso?<br>3. ¿Cómo es la gestión actual de los recursos hídricos en el área de estudio?<br>4. ¿Cuáles serían los incentivos de los habitantes de Amanalco de Becerra para apropiarse de una ecotecnología de tratamiento de agua como lo son los humedales artificiales (HA)? | Cualitativa:<br>estudio de caso                 | Entrevista a profundidad a actores clave  |
| 1. ¿Cuáles son las causas centrales de la eutroficación?, ¿cómo participan distintos actores en las prácticas que los generan?, ¿cuáles son las percepciones de los distintos actores? y ¿qué alternativas proponen éstos?<br>6. ¿Cuál sería el desempeño ambiental y económico de acoplar un HA a una PLA?   | Cuantitativo:<br>Análisis de datos estadísticos | Análisis de datos de calidad del río y de la presa tomados por CONAGUA                                    |
|   | Cualitativo:<br>estudio de caso                 | Entrevista a profundidad a actores clave institucionales  |
| 5. ¿Cuál es el costo de los servicios ambientales que prestarían los HA en el área de estudio?<br>6. ¿Cuál sería el desempeño ambiental y económico de acoplar un HA a una PLA?   | Cuantitativo:<br>Análisis de datos estadísticos | Análisis de costos de inversión y de operación de ambas tecnologías (HA y PLA) por separado y en conjunto |
|   | Cuantitativo:<br>Análisis de datos estadísticos | Uso de datos técnicos de las tecnologías, con base en ello calcular la remoción de contaminantes          |

Fuente: Elaborado con base en Sautu, Boniolo y Dalle, 2005

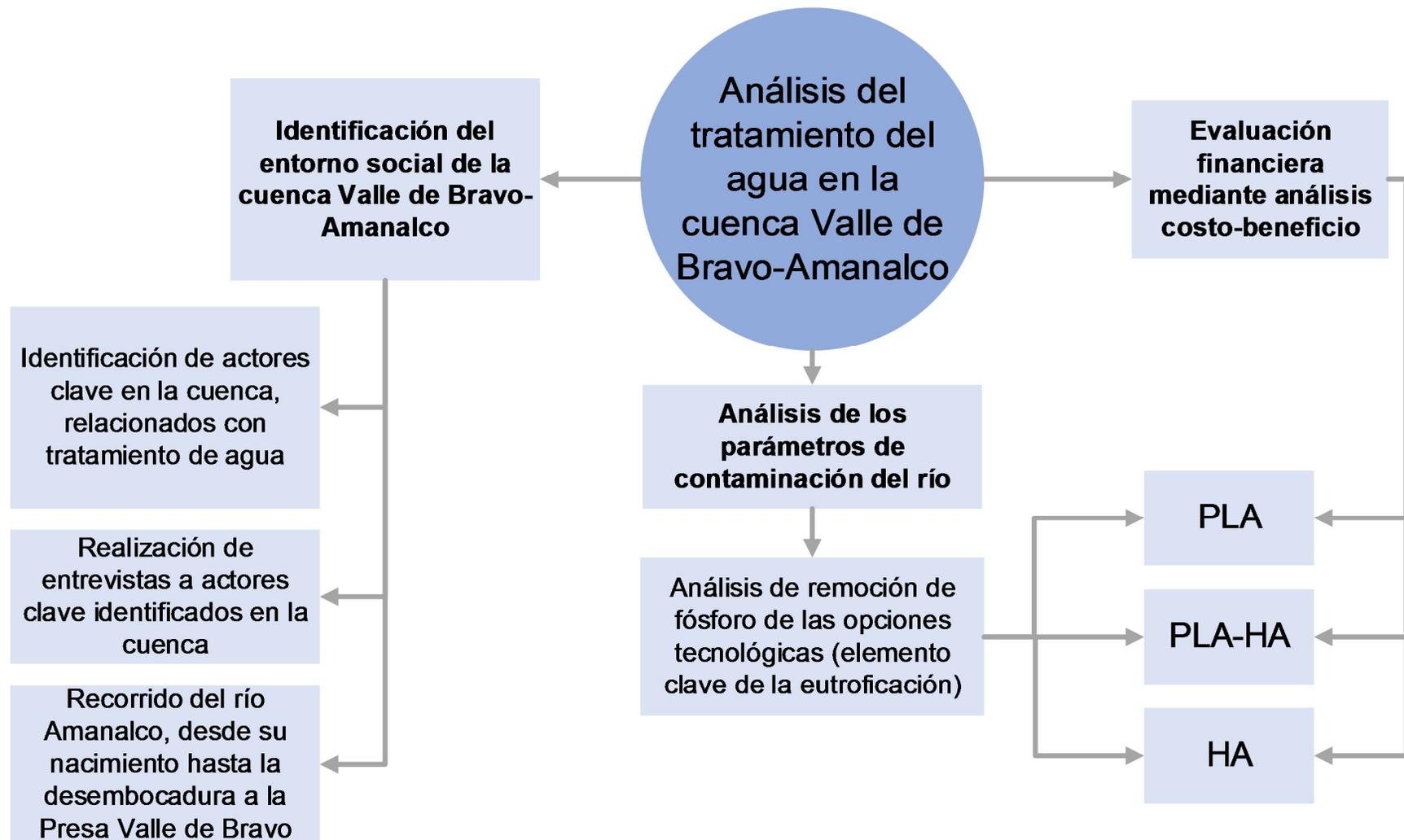


Figura 24.- Diagrama del diseño metodológico de la investigación

### III.1 Métodos de investigación social

Existen diversos métodos para la obtención de datos en las ciencias sociales (Sautu, Boniolo y Dalle, 2005), en el caso de la presente investigación, se eligió el estudio de caso y la forma de producción de datos por medio de una entrevista semiestructurada (Anexo 3).

Para realizar el análisis de datos recopilados se siguieron los siguientes pasos (Fernández-Nuñez, 2006):

#### 1. Realización de entrevistas a actores clave:

Se realizó un mapeo de actores en el área de estudio, se eligieron aquellos que desempeñarán cargos públicos en la cabecera municipal de Amanalco, así como líderes reconocidos por las personas de la comunidad, tales como delegados, presidente del Comité de agua potable, representantes de asociaciones civiles, así como funcionarios públicos o trabajadores cuyo trabajo está relacionado con el saneamiento del agua en la Cuenca Valle de Bravo – Amanalco.

Las entrevistas se realizaron en noviembre de 2016 y febrero de 2017, en la Tabla 13, se muestran los actores a los cuales se entrevistó durante los recorridos de campo.

**Tabla 13.- Actores entrevistados**

| <b>Actores</b>  | <b>No. Entrevistas</b> |
|---|------------------------|
| Presidencia municipal (secretario del Ayuntamiento de Amanalco)   | 1                      |
| Delegado de la localidad de San Mateo                             | 1                      |
| Lucía Madrid (Consejo Mexicano para la Silvicultura Sostenible)   | 1                      |
| Ejidatarios-productores agropecuarios                             | 3                      |
| Jefes de familia (hombres y mujeres)                              | 2                      |
| Presidente del comité de agua potable de la localidad de San Juan | 1                      |
| Operador de la PLA  | 1                      |
| Funcionarios de CONAGUA   | 2                      |
| Gerente de la Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco          | 1                      |
| Representante de Procuenca A.C:                                   | 1                      |

2. **Ordenamiento de la información obtenida:** a través de la transcripción de la información y creación de una base de datos
3. **Codificación de la información:** Se crearon categorías en las que se agrupó la información obtenida (Tabla 14).

**Tabla 14.- Categorías de organización de los datos obtenidos**

| <b>Temas</b>            | <b>Subtemas</b>  |
|-------------------------|--|
| Sistema social          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Organización social</li> <li>• Actores clave</li> <li>• Relación entre instituciones</li> <li>• Actividades económicas de subsistencia</li> </ul> |
| Sistema ambiental       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Percepción de condición del sistema hídrico</li> <li>• Disponibilidad de agua</li> <li>• Causas de degradación</li> </ul>                         |
| Situaciones de acción   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Acciones implementadas para hacer frente a causas de degradación</li> <li>• Acciones implementadas en tratamiento de agua</li> </ul>              |
| Criterios de evaluación | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Análisis Costo-Beneficio</li> </ul>   |

4. **Integración de la información:** se relacionaron las categorías, con base en el marco teórico.

### III.2 Propuesta conceptual de implementación de la PLA-HA

La PLA instalada tiene una capacidad de diseño de 18 LPS está compuesta por un tratamiento primario (criba y desarenador), tratamiento secundario (lodos activados) y un proceso terciario de desinfección con hipoclorito de sodio. La planta está diseñada para recircular una parte de los lodos provenientes del sedimentador secundario y el resto enviarlo a un digestor aerobio, posteriormente a un lecho de secado y finalmente utilizarlo en composteo (Figura 26).

La propuesta es incorporar un humedal artificial de flujo subsuperficial (HAFSS) de 9,611 m<sup>2</sup> (área 1 de la Figura 7), después del sedimentador secundario, en la ingeniería conceptual comprende 40 módulos de tratamiento con capacidad para tratar 480.6 m<sup>3</sup>/día (5.5 LPS), como se muestra en la Figura 27.

Se eligió únicamente realizar la evaluación del HA del área 1 debido a que, se considera que esos terrenos son más fáciles de negociar con las personas, al percibirse que son de un único dueño. En el área 2, existen múltiples comuneros que utilizan el área como agricultura de autoconsumo.

Debido a que no se cuentan con datos de las cinéticas específicas de las comunidades microbianas utilizadas en el reactor de lodos activados, se utilizarán datos reportados en la literatura de valores típicos de remoción de contaminantes de los parámetros utilizados para el diseño de las tecnologías, de igual forma, ya que la propuesta de HAFSS se encuentra en fase conceptual se consideraron los parámetros de la Tabla 15.

**Tabla 15.- Valores de referencia de remoción de contaminantes, según los parámetros que se utilizan para diseño de las tecnologías**

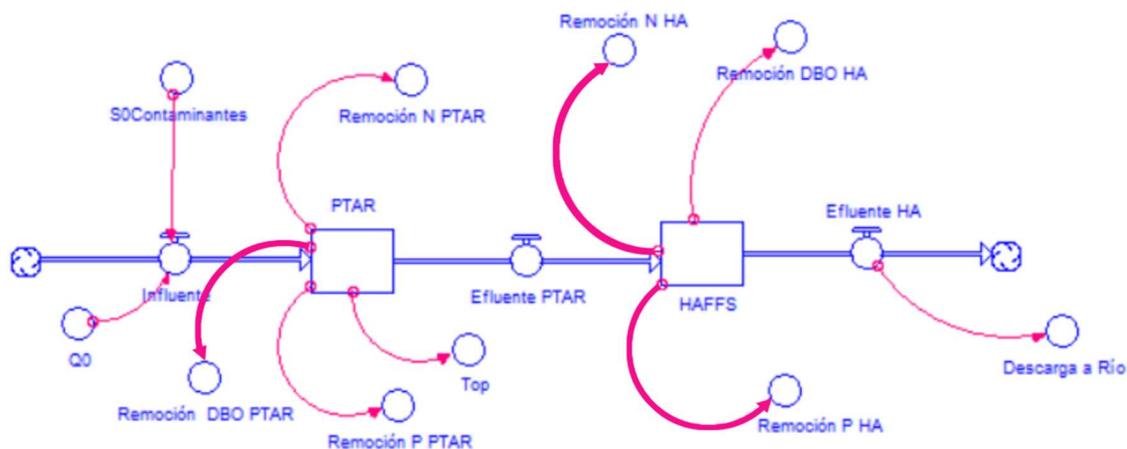
| % Remoción de contaminantes |                 |        |                        |        |
|-----------------------------|-----------------|--------|------------------------|--------|
| Parámetro                   | Lodos activados |        | Humedales artificiales |        |
|                             | Mínimo          | Máximo | Mínimo                 | Máximo |
| <b>DBO</b>                  | 85              | 95     | 35                     | 82     |
| <b>Fosfatos</b>             | 10              | 25     | 50                     | 94     |
| <b>Nitratos</b>             | 10              | 30     | 70                     | 75     |
| <b>SST</b>                  | 10              | 15     | 80                     | 85     |

Fuente: CONAGUA, 2007b; Scholz *et al* 2016; Vymazal, 2014

Stella es un programa de simulación por computadora, que proporciona un marco de referencia y una interfase gráfica de usuario para la observación e interacción cuantitativa de las variables de un sistema, lo cual puede ser utilizado para describir

y analizar sistemas complejos de diversa índole, tales como biológicos, físicos, químicos o sociales (Cervantes-Sandoval, Chiappa-Carrara y Dias-Marques, 2009).

El software se utiliza para la conceptualización del funcionamiento de la operación de la combinación PLA-HA (Figura 25).

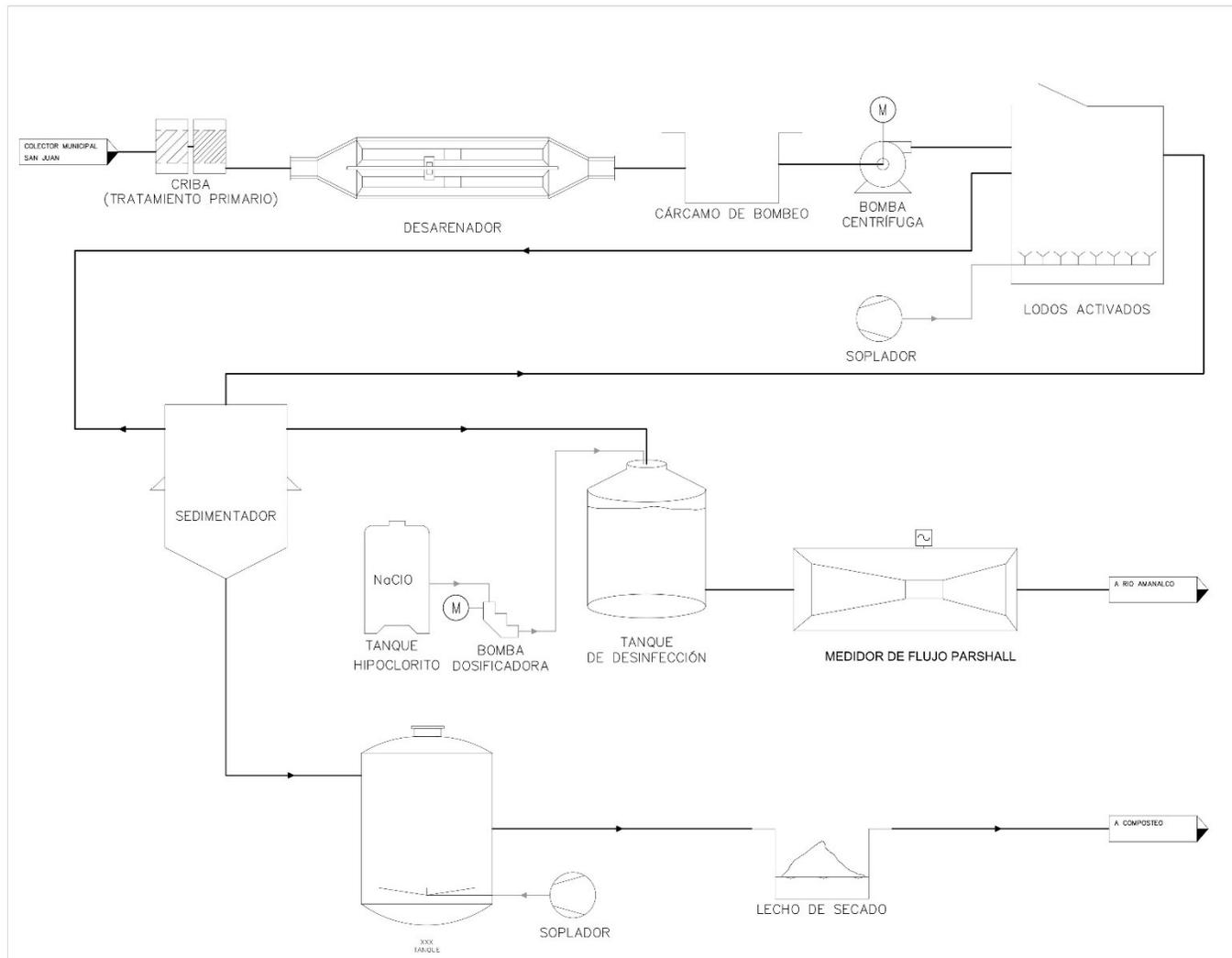


**Figura 25.- Conceptualización del funcionamiento PLA-HA**

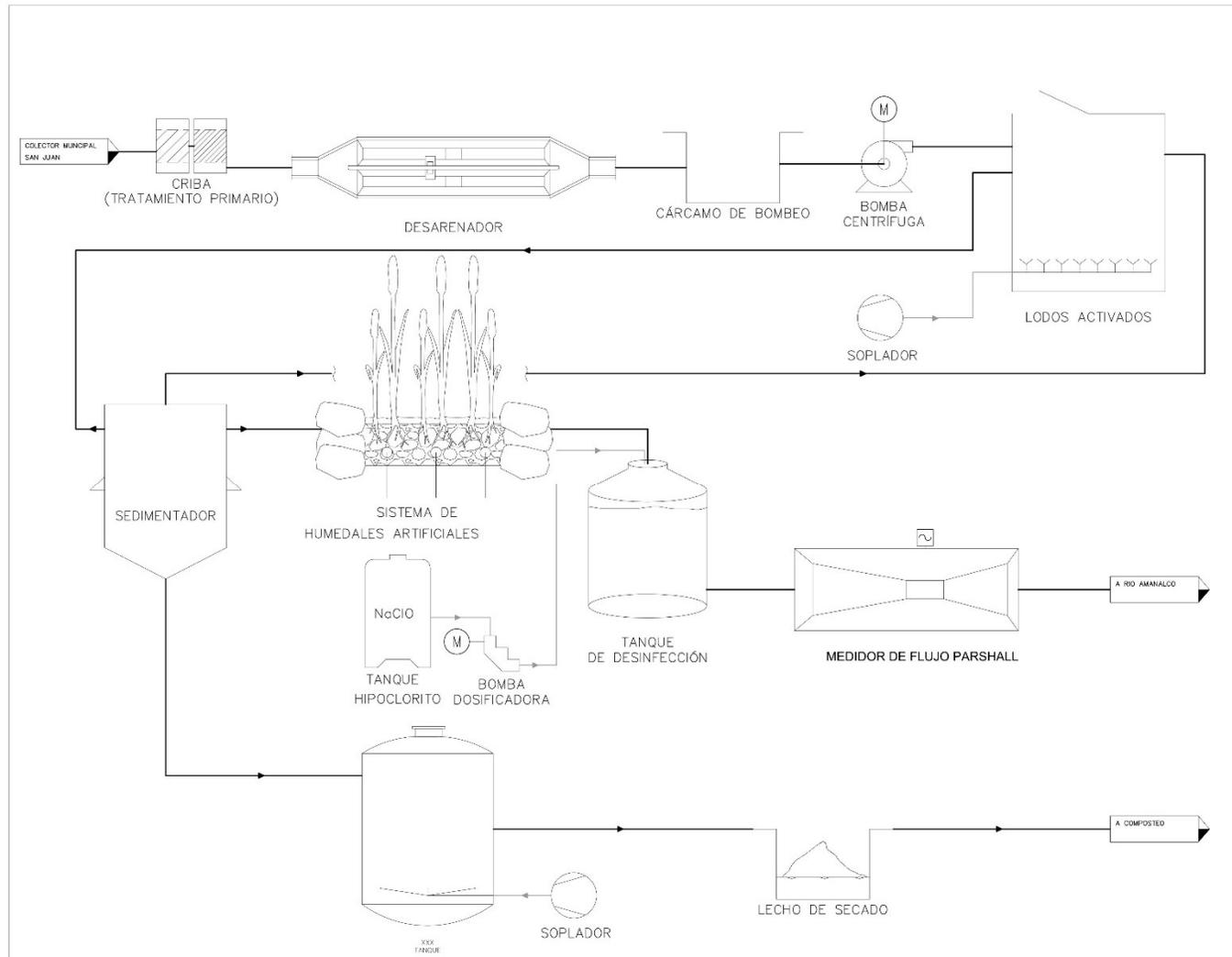
**Nota: Las flechas más gruesas indican la mayor remoción de contaminantes respecto a cada tecnología**

El cálculo de la remoción de contaminantes a través de balances de materia así como los valores de la Tabla 3 y Tabla 15, en los escenarios:

1. El escenario de operación actual, en el que el tratamiento del agua lo realiza únicamente la PLA (se considera que lo hace de forma continua, porque se desconocen los periodos de funcionamiento, debido a la falta de bitácoras de operación).
2. El escenario en el que se combina PLA- HA
3. El escenario de operación únicamente con humedales artificiales



**Figura 26.- Diagrama de Flujo de Proceso de la PLA**  
Fuente: Elaboración propia con base en recorrido en campo



**Figura 27.- Diagrama de Flujo de Proceso de la combinación PLA-HA**  
**Fuente: Elaboración propia con base en recorrido en campo**

---

### III.3 Método de valoración económica Análisis Costo-Beneficio

El análisis costo–beneficio (ACB) es una metodología de valoración económica que implica medir y comparar todos los beneficios y costos de un proyecto o programa público determinado. En esencia consiste en cuatro pasos (Barzev, 2002):

1. Especificar el proyecto o programa a evaluar
2. Describir en forma cuantitativa las entradas y salidas del proyecto o programa
3. Calcular los costos y beneficios económicos y sociales asociados a las entradas y salidas
4. Comparar los beneficios y los costos

El ACB es una herramienta que guía la toma de decisiones (Snell, 2011). En el caso del tratamiento de agua puede ser una herramienta útil para evaluar diversas tecnologías (Cristeche y Penna, 2008).

El uso de la metodología ACB se ha expandido en los últimos años en América Latina, Asia y África, tiene un alto potencial para agregar calidad, transparencia y eficiencia a la formulación de políticas públicas en cuestiones ambientales, de salud y seguridad, entre otros aspectos (Livermore, Glusman y Moyano, 2013).

La clave del ACB es identificar los beneficios relevantes y los costos asociados al proyecto, posteriormente cuantificarlos y evaluar en términos monetarios estos parámetros. La evaluación monetaria es especialmente difícil cuando los beneficios ambientales son intangibles, porque no existe un mercado para ello (Mushtaq, 2013).

Cuando los beneficios no tienen un mercado directo, por ejemplo el aire limpio, belleza escénica, impactos ambientales (positivos y negativos), se puede asociar costos indirectamente a través de diversos métodos de valoración económica (tales como valoración contingente, precios hedónicos, costo de viaje, costo de reemplazo, entre otros), o pueden ser obtenidos indirectamente asociando acciones de las personas, a través de sus preferencias (Snell, 2011).

Las etapas que se realizaron en el presente trabajo son las siguientes (Snell, 2011):

- 1. Definir las opciones existentes para determinado proyecto.**

Las opciones que se evalúan son los descritos en la sección anterior.

## 2. Fijar los criterios de decisión.

Los criterios que se tienen en cuenta son tiempo de vida del proyecto, tasa de descuento, así como el establecimiento de categorías de costos y beneficios.

Para la evaluación del tiempo de vida del proyecto es necesaria la actualización del costo de los diversos escenarios, al valor actual, a través de la utilización del Valor Actual Neto (VAN), el cual es un criterio que desde el punto de vista financiero permite aceptar o rechazar un proyecto, a partir de lo siguiente:

VAN < 0, se rechaza el proyecto

VAN = 0, el proyecto es indiferente

VAN > 0, se acepta el proyecto

El VAN se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde:

$V_t$ , son los ingresos menos los costos de los diferentes periodos  $t$  analizados

$k$ , tasa de interés de la inversión

$I_0$ , Inversión inicial

$t$ , periodos analizados (tiempo de vida del proyecto)

## 3. Estimar el costo de las diversas opciones

Se consideran los costos de inversión, de operación y mantenimiento de los tres escenarios, para ello se requiere la actualización de los precios y estar en condiciones de compararlos en el año 2017, la ecuación para realizarlo, es la siguiente:

$$Costo_{2017} = \frac{Costo_{año\ x} * INPP_{2017}}{INPP_{año\ x}}$$

Donde:

INPP, Índice Nacional de Precios al Productor

#### 4. Estimar los beneficios que podría tener el proyecto

Los beneficios que el proyecto en los escenarios anteriormente descritos son:

4.1 La evaluación costo-beneficio del tratamiento de agua en general en cada escenario, para ello se utiliza el servicio de recreación, debido a que es el parámetro que tiene un mercado directo.

4.2 El costo de los servicios ambientales que los HA proveen, los cuales son los siguientes:

- Agua de mejor calidad
- Recreación
- Investigación y educación
- Impacto positivo en agricultura y salud de las poblaciones aledañas
- Impacto en biodiversidad y hábitat de especies
- Estética
- Regulación de micro-clima

Asimismo, se requiere realizar la actualización de los costos de los beneficios hacia el año 2017, con la siguiente ecuación:

$$Costo_{2017} = \frac{Costo_{año\ x} * INPC_{2017}}{INPC_{año\ x}}$$

Donde:

*INPP, Índice Nacional de Precios al Consumidor*

5. **Comparar los costos y los beneficios, es decir, descontar los beneficios de los costos.**
6. **Considerar la incertidumbre y el rango de otros posibles resultados (análisis de sensibilidad)**
7. **Aplicar los criterios del ACB (paso 2) y considerar otras posibles guías relevantes, tales como la regulación ambiental, de uso de suelo, entre otros, para tomar una decisión.**

## **IV RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN: EL CASO DE LA PLA AMANALCO**

Para estar en condiciones de entender los factores sociales, institucionales y económicos que influyen en la implementación de humedales artificiales como apoyo a la PLA de Amanalco de Becerra, es necesario entender la dinámica de la cuenca Valle de Bravo – Amanalco.

En la Cuenca existen 14 PTAR instaladas con capacidad de tratamiento total de 192 LPS el total de la inversión para la construcción fue de 90 millones de pesos, sin considerar 5 plantas, de las que se desconoce el dato (Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, 2014).

Actualmente, en la cuenca sólo opera todo el año la planta conocida como “El arco”, la cual se encuentra en el municipio de Valle de Bravo, con una capacidad instalada de 150 L/s, la cual se mantiene por medio de un convenio tripartita de recursos federales, estatales y municipales, trata el agua del río Amanalco previo a la entrada a la presa Valle de Bravo.

Como ya se mencionó, la PLA evaluada en la presente investigación tiene una capacidad de diseño de 18 LPS, es operada por la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM), debido a que el ayuntamiento de Amanalco no tiene los recursos para hacerlo. Durante las visitas a campo se informó que los sopladores del reactor biológico no funcionan desde hace un año (entrevista 03 de febrero de 2017), por lo que el proceso de lodos activados no degrada los contaminantes del agua.

En las visitas a campo se observó descarga de agua en la salida de la planta hacia el río Amanalco, con tensoactivos (formación de espuma) y olor desagradable (Figura 28 y Figura 29).

A continuación, se presenta una descripción de los aspectos socioeconómicos y ambientales identificados, los resultados de la propuesta conceptual de ingeniería y el ACB, para terminar este apartado con la discusión.



**Figura 28.- Salida de agua de la PLA hacia el río (visita 22 de noviembre de 2016)**

**Fotografía: Francisco J. Lemus**



**Figura 29.- Salida de agua de la PLA hacia el río (visita 03 de febrero de 2017)**

**Fotografía: Francisco J. Lemus**

## IV.1 Aspectos socioeconómicos y ambientales

### IV.1.1 Sistema socioeconómico

A pesar de que la cuenca Valle de Bravo-Amanalco abarca ocho municipios del Estado de México (Tabla 16), únicamente comprende la totalidad del territorio de Amanalco, seguido de más de la mitad de la superficie del municipio de Valle de Bravo, es por ello que el sistema social que se considera son estos dos municipios, priorizando el de Amanalco (porque en él se encuentra la PLA de interés).

**Tabla 16.- Municipios que componen la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco**

| Municipio          | Porcentaje de la superficie de la cuenca respecto a la municipal |
|--------------------|--|
| Amanalco           | 100  |
| Valle de Bravo     | 66.11  |
| Donato Guerra      | 22.8   |
| Villa de Allende   | 12.8   |
| Villa Victoria     | 5.6  |
| Temascaltepec      | 2.9  |
| Almoloya de Juárez | 0.4  |
| Zinacatepec        | 2.7  |

Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Fundación Gonzalo Río Arronte, 2012

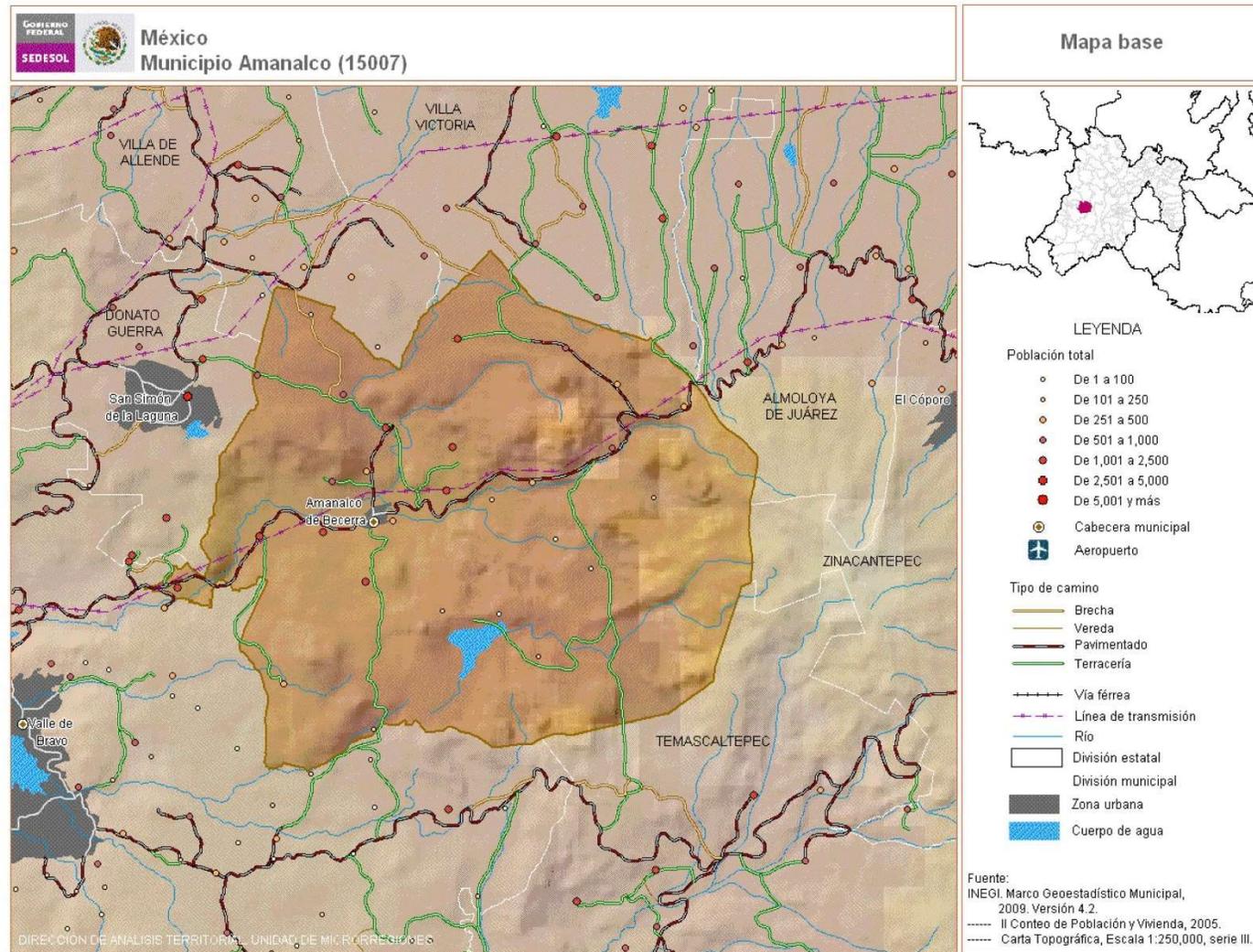
De acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2010a), Amanalco es un municipio no urbano, tiene localidades con marginación muy alta y alta, siendo la cabecera municipal la única localidad de grado de marginación medio (Figura 30). Esto contrasta con el grado de marginación bajo del municipio de Valle de Bravo (SEDESOL, 2010b; Figura 31).

En Amanalco, de la población económicamente activa, aproximadamente el 30% se dedica a actividades primarias como agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza, seguido del 26% al sector secundario del que destaca el 17% que se dedica a la construcción, en el sector terciario se encuentra ocupado el 42% restante (SEDESOL, 2010a).

La población económicamente activa del municipio de Valle de Bravo, se encuentra ocupada en 12% en el sector primario, 28% en el sector secundario y el 60% en actividades del sector terciario (SEDESOL, 2010b).

La organización social del municipio de Amanalco es en propiedad colectiva (ejidos y bienes comunales), aproximadamente 80% de las 20 localidades que lo conforman, el resto es propiedad privada (principalmente la cabecera municipal, entrevista con el secretario de Ayuntamiento de Amanalco, 22 de noviembre de 2016). La mayor parte del territorio de Valle de Bravo es propiedad privada.

En el municipio de Amanalco, cada comunidad tiene comités de agua potable, excepto la cabecera municipal, porque el ayuntamiento lleva esos asuntos. En el 2005, en la cabecera municipal se creó un organismo operador de agua potable (APAS) que actualmente se mantiene sin operar (entrevista con el secretario de Ayuntamiento de Amanalco, 22 de noviembre de 2016). En Valle de Bravo, existe un organismo descentralizado de agua potable, alcantarillado y saneamiento (ODAPAS) que se mantiene funcionado, es quien se encarga del abastecimiento, dotación de las tomas de agua, mantenimiento y cobros por los servicios (Valle de Bravo ODAPAS, s.f.).



**Figura 30.- Mapa base del municipio de Amanalco**  
**Fuente: SEDESOL, 2010a**

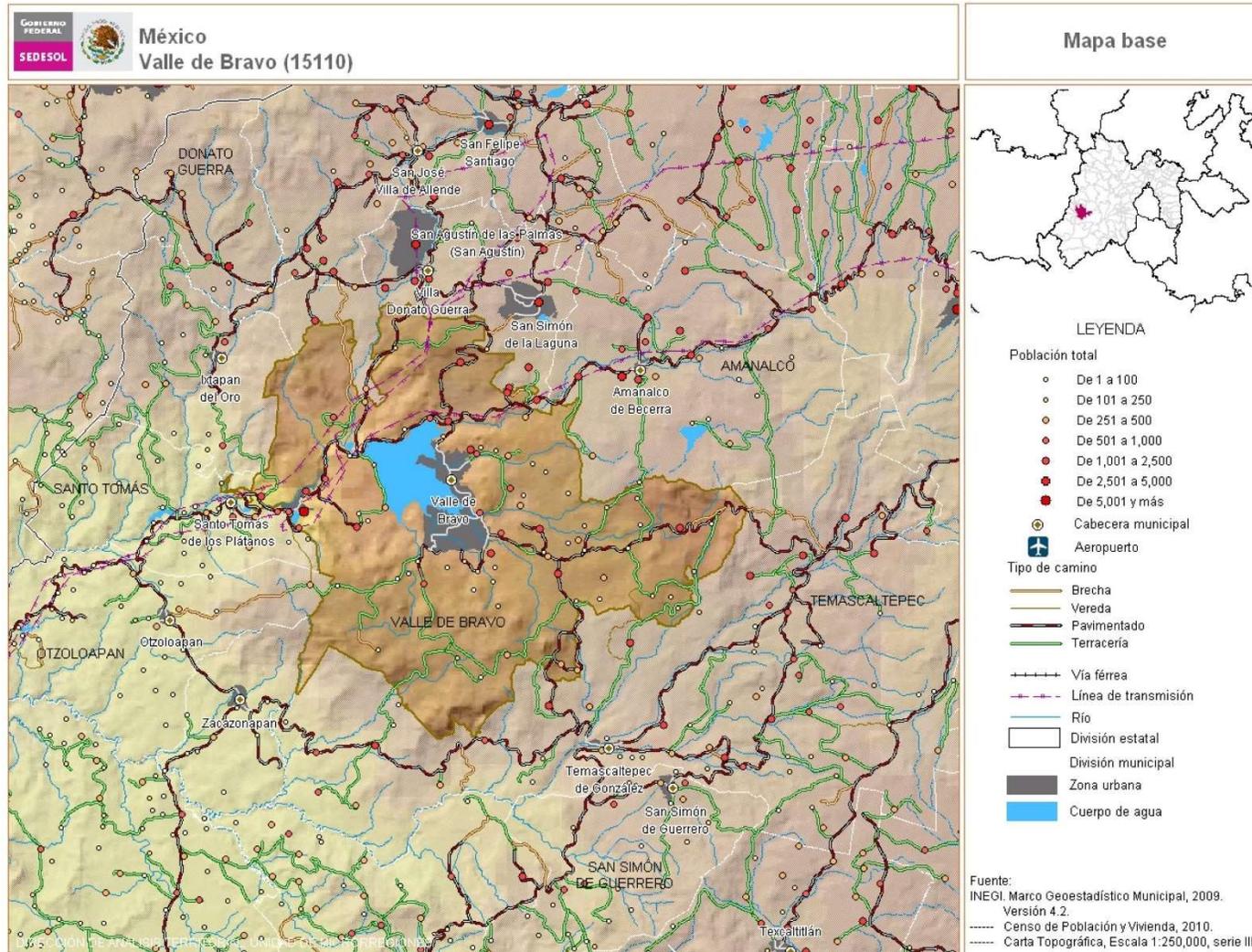


Figura 31.- Mapa base del municipio de Valle de Bravo

Fuente: SEDESOL, 2010b

Existen diversas instituciones en la cuenca, como lo señala el Banco Mundial (2015), es la cuenca del sistema Cutzamala con mayor organización social, civil e institucional, así como con planes y programas. Derivado de ello, existe un complejo actuar de diversas instituciones (formales y no formales), en el ámbito de la formalidad, es la Ley de Aguas Nacionales (LAN) la que regula la explotación, uso o aprovechamiento del recurso hídrico, así como su distribución, control y preservación de su cantidad y calidad con el objetivo de lograr su desarrollo integral sustentable (Artículo 1°, LAN).

La LAN reglamenta las competencias y líneas de acción de diversos actores que tienen diferentes grados de injerencia en la toma de decisiones en la Cuenca, sin embargo, no establece de manera específica algunas figuras como los comités de agua potable.

#### **IV.1.1.1 Actores y roles**

En la Figura 32, se muestra el mapeo de los actores identificados, así como la interrelación entre ellos y los recursos hídricos de interés para la presente investigación de la cuenca (río Amanalco de forma directa e indirectamente la Presa Valle de Bravo).

#### **Organismo de cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM):**

En el artículo 3° de la LAN, se define organismo de cuenca como:

***XXXIX. "Organismo de Cuenca":** Unidad técnica, administrativa y jurídica especializada, con carácter autónomo, adscrita directamente al Titular de "la Comisión", cuyas atribuciones se establecen en la presente Ley y sus reglamentos, y cuyos recursos y presupuesto específicos son determinados por "la Comisión";*

El OCAVM es la institución que tiene dentro de sus objetivos la administración y custodia de la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad, el fomento y apoyo al desarrollo de los sistemas de agua potable, tratamiento, reúso de aguas y en general mantenimiento en buen estado de infraestructura hidráulica, para lograr un desarrollo integral sustentable en la región hidrológico administrativa XIII (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2010).

El OCAVM también tiene a su cargo la operación del sistema Cutzamala, por lo que el nivel al que trabaja este organismo son las cuencas que abastecen dicho sistema, la mayor limitación a la que se enfrentan es la falta de recursos económicos, no destinan parte de éstos al ámbito del tratamiento del agua residual municipal (porque es competencia de los municipios), sin embargo, gestionan fideicomisos para apoyar a los Estados y municipios (entrevista a la subgerencia de potabilización, saneamiento y apoyo a organismos operadores y la jefatura de proyectos de plantas potabilizadoras y aguas residuales del OCAVM, 13 de febrero de 2017).

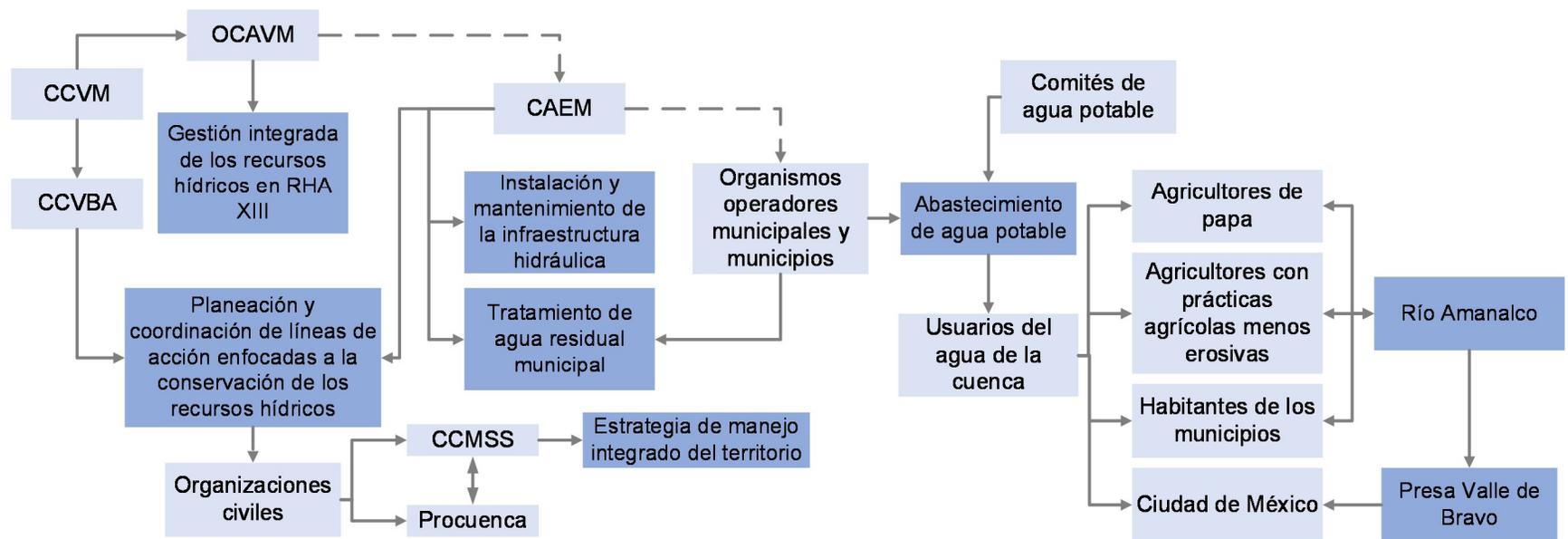
Esta instancia apoya a los organismos operadores de los municipios para cumplir con las NOM de descarga, asimismo, tiene bajo su cargo la Planta potabilizadora "Los Berros", porque forma parte del sistema Cutzamala. En ese sentido, la importancia del tratamiento del agua municipal radica en mejorar el agua que llega a las diversas presas de este sistema y con ello disminuir los costos de la potabilización (entrevista a la subgerencia de potabilización, saneamiento y apoyo a organismos operadores y la jefatura de proyectos de plantas potabilizadoras y aguas residuales del OCAVM, 13 de febrero de 2017).

#### **Consejo de Cuenca Aguas del Valle de México (CCVM):**

Esta institución, también se encuentra definida en el artículo 3° de la LAN, según se cita:

***XV. "Consejo de Cuenca":** Órganos colegiados de integración mixta, que serán instancia de coordinación y concertación, apoyo, consulta y asesoría, entre "la Comisión", incluyendo el Organismo de Cuenca que corresponda, y las dependencias y entidades de las instancias federal, estatal o municipal, y los representantes de los usuarios de agua y de las organizaciones de la sociedad, de la respectiva cuenca hidrológica o región hidrológica;*

El CCVM es la instancia de coordinación y concertación entre la CONAGUA las dependencias y entidades federales, estatales o municipales y los representantes de los usuarios de la cuenca hidrológica, su objetivo es la formulación y ejecución de programas y acciones para mejorar la administración del recurso hídrico, el desarrollo de infraestructura hidráulica y la preservación de los recursos de la cuenca (Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, 2010).



**Figura 32.- Actores en la cuenca Valle de Bravo-Amanalco**  
 Fuente: Elaboración propia

---

### **Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco (CCVBA)**

La CCVBA es parte del Consejo de Cuenca Aguas del Valle de México (CCVM), se constituyó en 2003. Tiene como objetivo planear y coordinar las acciones de administración y conservación que se realicen en relación con el agua y los recursos naturales asociados a ella, en el ámbito de la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, debido a que es una cuenca de segundo orden que pertenece a la Cuenca del Río Cutzamala (Consejo de Cuenca del Valle de México, 2016).

La CCVBA no cuenta con presupuesto para dar servicios o realizar obras, no obstante, en sus líneas de acción se encuentran la planeación y coordinación para la ejecución de obras y acciones en diferentes dimensiones, tales como el saneamiento de los afluentes y de la presa Valle de Bravo, el cuidado del suelo y de los bosques, la reforestación y el combate de incendios, la reglamentación del desarrollo urbano y el fomento a las actividades económicas de la población bajo un enfoque sustentable (Consejo de Cuenca del Valle de México, 2016).

### **Comisión del Agua del Estado de México (CAEM):**

La CAEM es un organismo operador, de acuerdo con el artículo 6° fracción L de la Ley del agua para el estado de México y municipios, éstos se definen como:

***L. Organismo operador:** Organismo operador de agua, que puede ser una dependencia estatal o municipal, u organismo descentralizado municipal o intermunicipal que en los términos de la presente Ley tiene la responsabilidad de administrar y operar los servicios, conservar, dar mantenimiento, rehabilitar y ampliar los sistemas de suministro, de drenaje y de alcantarillado, y en su caso, el tratamiento de aguas y su reúso, así como la disposición final de sus productos resultantes, dentro del ámbito territorial que le corresponda;*

Es decir, estos organismos se encargan de administrar y operar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, para dotar de estos servicios a los habitantes de un municipio o de una entidad federativa, asimismo, pueden tener diferentes denominaciones, tales como: sistemas de agua, direcciones, comisiones, juntas locales, departamentos y comités, entre otros, de acuerdo a la estructura orgánica a la que pertenezcan (Centro Virtual de Información del Agua, s.f.).

En el caso de la CAEM, se encuentra definida en el artículo 17 de la Ley del agua para el estado de México y municipios, como:

**Artículo 17.** *La Comisión es un organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propios, sectorizado a la Secretaría (de infraestructura), con carácter de autoridad fiscal. La Comisión tiene por objeto planear, programar, presupuestar, diseñar, construir, conservar, mantener, operar y administrar sistemas de suministro de agua potable, desinfección, drenaje, alcantarillado, saneamiento, tratamiento y reúso de aguas tratadas, así como la disposición final de sus productos resultantes, e imponer las sanciones que correspondan en caso de incumplimiento de la normatividad en la materia.*

En la cuenca Valle de Bravo-Amanalco, en los últimos años ha instalado colectores en la cabecera municipal, la localidad de San Juan y San Mateo, para conectarlos a la PLA de Amanalco, sin embargo, el tubo de la cabecera municipal y de San Mateo no fueron conectados a la planta (entrevista a secretario del Ayuntamiento de Amanalco y delegado de la localidad de San Juan, 22 de noviembre de 2016).

### **Comités de agua potable**

Estas instituciones no están explícitamente reconocidas en la LAN, sin embargo, en el artículo 3° de la LAN, se define la gestión del agua como:

**XXVIII. "Gestión del Agua":** *Proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, **normas formales y no formales**<sup>1</sup>, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende su distribución y administración, (2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua, y (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. La gestión del agua comprende en su totalidad a la administración gubernamental del agua;*

En dicha definición, se consideran las normas no formales para lograr, entre otras cuestiones, una mejor administración y distribución de los recursos hídricos, por lo que los comités de agua potable, se amparan bajo esta fracción de la LAN.

<sup>1</sup> El resaltado es mío

Los comités de agua potable de las localidades se manejan por usos y costumbres (comunidades otomíes), se encargan del mantenimiento y reparación de la infraestructura de abastecimiento de agua potable de los manantiales a los hogares de la comunidad, de otorgar las tomas de agua y de la organización de las actividades de mantenimiento. Realizan asambleas trimestrales, dependiendo de los asuntos a tratar, si no hay mayoría se repite la asamblea. Sólo tienen injerencia en agua potable, para el agua de riego existe otro comité (entrevista con el presidente del comité de agua potable de la localidad de San Juan, 03 de febrero de 2017).

### **Organizaciones civiles**

En la cuenca existen diversas organizaciones civiles enfocadas en disminuir el deterioro de la cuenca y mejorar la calidad de vida de sus habitantes, las más activas son:

#### **Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible AC (CCMSS)**

Es una asociación civil sin fines de lucro, constituida en 1996, está conformada por organizaciones no gubernamentales, investigadores y académicos que buscan “impulsar la puesta en marcha de estrategias regionales de manejo de territorios rurales, el aprovechamiento sustentable los recursos naturales y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural, a través a través del análisis, generación y difusión de información, de la construcción de propuestas de solución a la problemática así como de asesoría a organismos campesinos, no gubernamentales y del sector público” (CCMSS, 2015).

En la cuenca Valle de Bravo-Amanalco, la coordinadora de la organización es la maestra Lucía Madrid Ramírez. Actualmente tiene una activa participación en el trabajo con ejidos y comunidades con acciones encaminadas hacia la implementación de una estrategia de manejo integrado del territorio basada en: (CCMSS, s.f.; Recorrido en campo, 02 de febrero de 2017).

- Planeación territorial participativa
- Desarrollo de políticas comunitarias e implementación de mejores prácticas de manejo de los recursos naturales (principalmente suelo, bosques y agua)
- Fortalecimiento del capital social y de la gobernanza

## **Fondo Procuena Valle de Bravo AC**

Es una asociación civil que busca mejorar las condiciones de la cuenca, a través de estrategias, proyectos y acciones que favorezcan el mantenimiento de los bosques y el agua, así como el mejoramiento de la calidad de los ecosistemas a través de fomentar una nueva relación de los pobladores con su entorno natural (Procuena, s.f.).

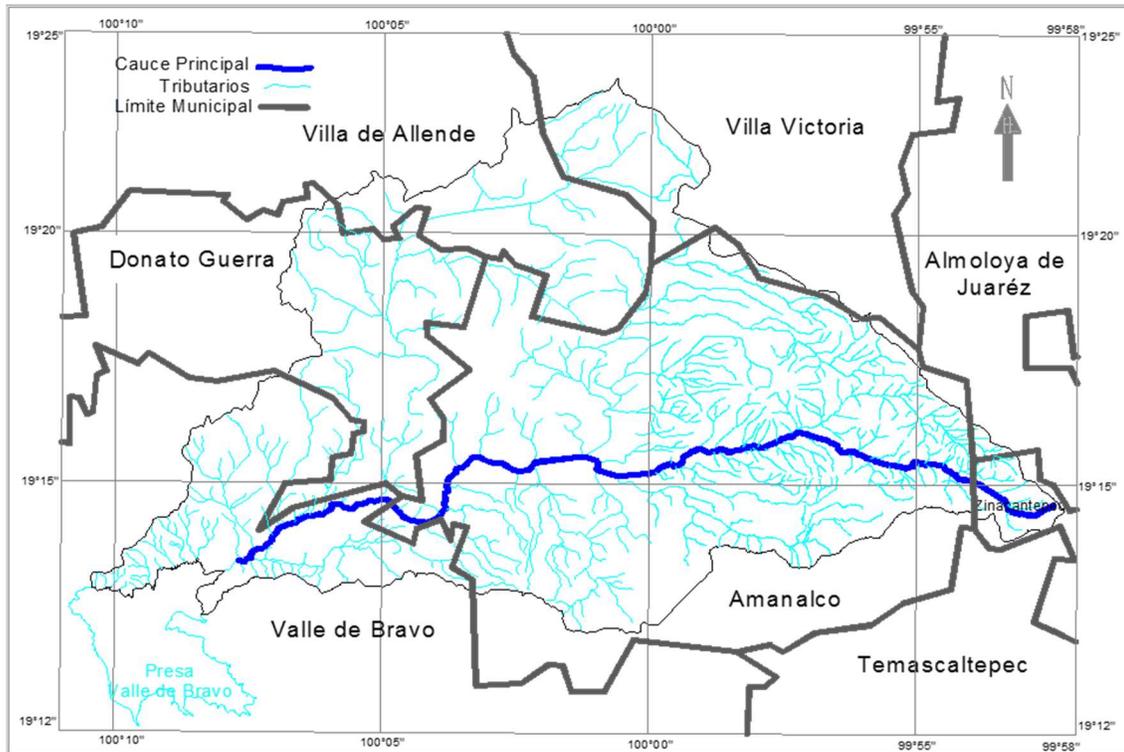
Actualmente la asociación trabaja implementando ecotecnias en la parte alta y media de la cuenca, tales como pozos de absorción de aguas grises (evitar que esta agua llegue a los cuerpos de agua sin un tratamiento previo), baños secos (para disminuir la producción de aguas negras), así como el monitoreo de la calidad de agua en el río Amanalco en trabajo conjunto con el CCMSS (entrevista a capacitador técnico de Procuena, 03 de febrero de 2017).

El trabajo que realiza Procuena, también contempla la apropiación de las ecotecnologías que proponen, a través de capacitar a las personas que deciden participar en los programas, haciéndolos partícipes con la aportación del 10% de los materiales y su construcción (entrevista a capacitador técnico de Procuena, 03 de febrero de 2017).

### **IV.1.2 Sistema ambiental**

En la Figura 33, se observa que la cuenca es un complejo entramado de cuerpos de agua tributarios al río Amanalco, resultado de la topografía de la región.

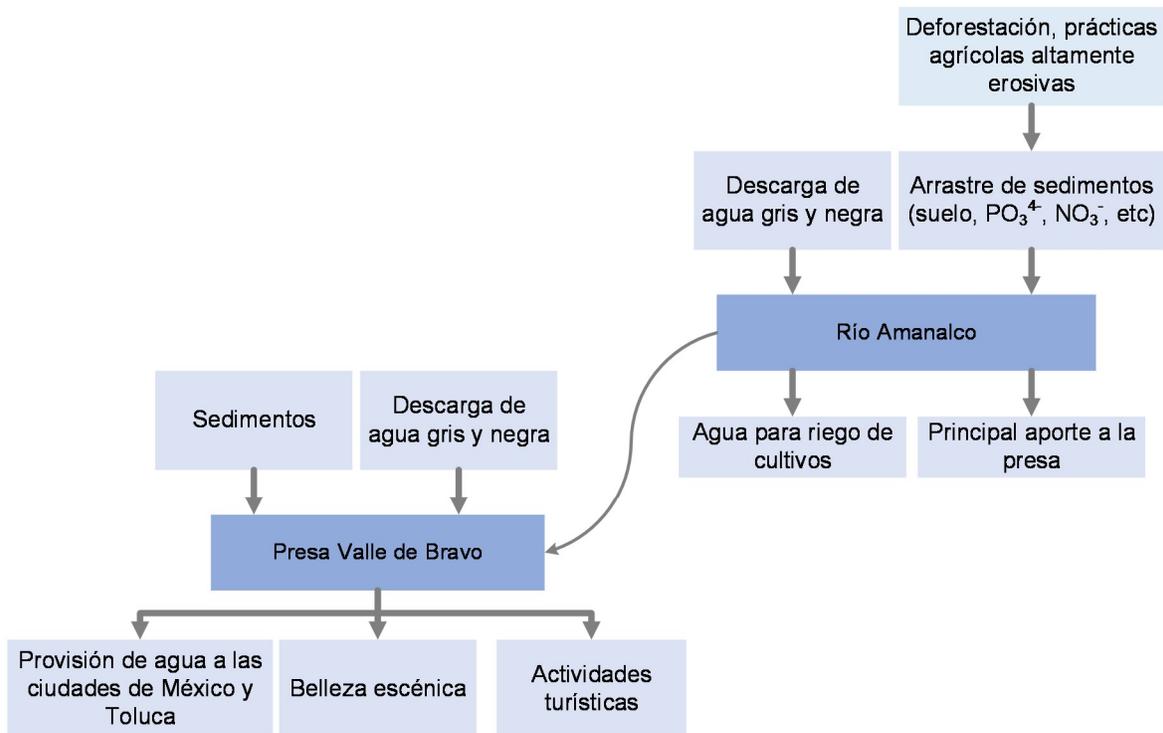
No existe una clara cronología de la fragmentación del sistema ambiental, en la década de los 30's, existió una laguna en la que desembocaban los ríos Amanalco y sus tributarios. Los procesos de desecación de la laguna no están claros en la memoria colectiva de los habitantes aledaños, sin embargo, coinciden en que las causas principales fueron la construcción de la presa en Valle de Bravo, como parte del sistema hidroeléctrico Miguel Alemán, la instalación de torres eléctricas y la solicitud de las personas de tener tierras agrícolas (entrevista a coordinación del CCMSS y secretario del ayuntamiento de Amanalco, 22 de noviembre de 2017).



**Figura 33.- Cauce del río Amanalco**

Fuente: OCAVM, 2015

Actualmente, en el río Amanalco varias comunidades, tales como San Mateo y San Juan, vierten sus aguas grises y negras, porque aún no existen colectores, a su vez también se tienen reportadas este tipo de descargas directamente hacia la Presa. En la Figura 34, se esquematiza las principales entradas de contaminantes al río Amanalco y la presa Valle de Bravo, así como los servicios ambientales que estos recursos proveen.



**Figura 34.- Sistema ambiental actual y principales servicios de los recursos hídricos**

Fuente: Elaboración propia

Actualmente a la zona cercana a la PLA se le conoce como “la laguna” o el “valle”, debido a que se formaba la antigua laguna, por ello es común que anualmente esa zona se inunde, afectando con ello la infraestructura de la planta.

Adicionalmente, con el proceso de desecación de “la laguna” se realizó un canal de riego artificial, por el que se canaliza el cauce del río Amanalco, dicho canal se azolva con los sedimentos que arrastra el río cuenca arriba, producto de las actividades agrícolas en la zona, por lo que su mantenimiento resulta costoso (entrevista a coordinación del CCMSS, 22 de noviembre de 2017).

La cuenca Valle de Bravo-Amanalco, al formar parte del sistema Cutzamala, ha sido impactada por la modificación de los cauces naturales de los ríos y el represamiento de agua, lo que se ve traducido en problemas ambientales como el de contaminación de la parte media y baja del río Amanalco y la eutroficación de la presa Valle de Bravo (Figura 35).

El estado de eutroficación de la presa, es un proceso complejo, multifactorial y por ello se requiere la actuación en las diversas causas que lo ocasionan, desde los factores antropogénicos (agricultura extensiva, poca capacidad de tratamiento del

agua municipal, descarga de aguas residuales a los ríos, falta de coordinación y comunicación entre las instituciones formales, cambio en el ciclo de nutrientes y flujos hídricos), hasta los de causas naturales (topografía, tipo de suelo).



**Figura 35.- Procesos que contribuyen al estado trófico de la Presa**

Fuente: Elaboración propia

En la cuenca se efectúan diversas acciones enfocadas en disminuir la carga de contaminantes sobre el río Amanalco, como trabajar en la parte alta de la cuenca con la construcción de diversas ecotecnias (pozos de absorción para disposición de agua gris, baños secos para la no producción de agua negra, construcción de sistemas de cosecha de lluvia) así como el monitoreo de la calidad del agua (entrevista a capacitador técnico de Procuenca, 03 de febrero de 2017).

## **IV.2 Resultados de la propuesta conceptual de implementación de la PLA-HA**

Diversos muestreos de la calidad del río Amanalco han sido realizados, por varias instituciones, entre ellas la OCAVM, el instituto de ecología de la UNAM, así como las organizaciones civiles CCMSS y Procuenca, éstos últimos únicamente han medido parámetros bacteriológicos (coliformes fecales).

En los datos reportados por Pérez, *et al.* (2016), el río Amanalco cumple con los límites máximos permisibles (LMP) por la NOM-001-SEMARNAT-1996, sólo se sobrepasan los valores de coliformes fecales, lo que coincide con los valores medidos mensualmente por Procuencia y el CCMSS (Procuencia, 2017).

En el presente trabajo se analizaron los datos proporcionados por el OCAVM, los cuales fueron medidos a lo largo del cauce del río mensualmente en época de estiaje y lluvia, como se observa en la Tabla 17, los valores no rebasan los LMP por la mencionada norma, sin embargo ello no es garantía de que el agua del río no contribuya con el proceso de eutroficación de la Presa, puesto que el fósforo puede encontrarse en los sedimentos del río, en los cuales no se realizaron mediciones de su concentración.

Es importante considerar, que los muestreos realizados son puntuales y dependen de la época del año, en los cuales puede existir variación del flujo del río, así como del arrastre de contaminantes a éste.

Debido a que no se tuvo acceso al influente de entrada de la PLA, el cual probablemente sólo proviene del colector de la localidad de San Juan, puesto que el colector de la cabecera municipal no fue conectado a la planta (entrevista con el secretario de Ayuntamiento de Amanalco, 22 de noviembre de 2016), se consideran valores típicos de agua residual municipal, reportados en la literatura (Tabla 3).

En la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se muestra la remoción de los contaminantes de la PLA, PLA-HA y de los HA.

Tabla 17.- Resultados del muestreo realizado por OCAVM al cauce del río Amanalco

| Parámetro                          | NOM-001-SEMARNAT-1996 | Punto de muestreo |              |                         |            |             |             |            |              |              |             |              |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------|-------------------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                    | Ríos                  | Desembocadura     |              |                         | 1          |             |             | 2          |              |              | 3           |              |              | 4           |             |             | 5           |             |             | 6           |             |             |
|                                    | Uso público urbano    | Mín               | Máx          | Media                   | Min        | Máx         | Media       | Mín        | Máx          | Media        | Mín         | Máx          | Media        | Mín         | Máx         | Media       | Mín         | Máx         | Media       | Mín         | Máx         | Media       |
|                                    |                       |                   |              |                         |            |             |             |            |              |              |             |              |              |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>DBO<sub>5</sub></b>             | <b>75</b>             | 4                 | 15           | 9.5                     | <2         | 18          | 8.333       | <2         | 10           | 5.25         | 3           | 3            | 3            | 4           | 4           | 4           |             |             | --          | <2          | <2          | <2          |
| <b>DQO</b>                         |                       | <b>13</b>         | <b>80</b>    | <b>46</b>               | <b>15</b>  | <b>71</b>   | <b>41</b>   | <b>12</b>  | <b>78</b>    | <b>43.33</b> | <b>37</b>   | <b>80</b>    | <b>58.5</b>  | <b>23</b>   | <b>73</b>   | <b>48</b>   | <b>55</b>   | <b>55</b>   | <b>55</b>   | <b>12</b>   | <b>12</b>   | <b>12</b>   |
| <b>Fósforo total</b>               | <b>20</b>             | 0.2               | 2.84         | 1.55                    | 0.15       | 2.48        | 1.39        | 0.19       | 3.35         | 1.56         | 0.21        | 1.69         | 0.81         | 0.25        | 1.73        | 0.83        | 1.51        | 1.51        | 1.51        | 7.65        | 7.65        | 7.65        |
| <b>Fosfatos</b>                    |                       | 0.18              | <b>1.13</b>  | <b>0.53<sup>a</sup></b> | 0.11       | <b>1.07</b> | <b>0.5</b>  | 0.15       | <b>1.25</b>  | <b>0.56</b>  | 0.17        | 0.49         | 0.32         | 0.19        | <b>0.5</b>  | 0.35        | <b>1.24</b> | <b>1.24</b> | <b>1.24</b> | <b>5.13</b> | <b>5.13</b> | <b>5.13</b> |
| <b>Nitrógeno total Kjeldahl</b>    |                       | <b>1.21</b>       | <b>18.95</b> | <b>7.48</b>             | <b>0.6</b> | <b>6.71</b> | <b>2.89</b> | <b>0.6</b> | <b>19.53</b> | <b>7.015</b> | <b>0.6</b>  | <b>26.25</b> | <b>9.357</b> | <b>0.6</b>  | <b>4.88</b> | <b>2.64</b> | <b>0.61</b> | <b>0.61</b> | <b>0.61</b> | <b>1.22</b> | <b>1.22</b> | <b>1.22</b> |
| <b>N-Nitratos</b>                  |                       | 2.00E-02          | 0.42         | 0.173                   | 0.02       | 0.37        | 0.13        | 0.03       | 0.36         | 0.145        | 3.00E-02    | 0.11         | 0.06         | 0.04        | 0.26        | 0.13        | 0.36        | 0.36        | 0.36        | <b>0.68</b> | <b>0.68</b> | <b>0.68</b> |
| <b>N-nitritos</b>                  |                       | 8.00E-03          | 0.027        | 0.015                   | 0.014      | 0.03        | 0.021       | 0.022      | 0.06         | 0.041        | 8.00E-03    | 0.025        | 0.015        | 0.012       | 0.022       | 0.018       | 0.01        | 0.01        | 0.01        | 0.013       | 0.013       | 0.013       |
| <b>Nitrógeno amoniacal</b>         |                       | 0.36              | <b>9.55</b>  | <b>3.55</b>             | 0.33       | <b>3.08</b> | <b>1.29</b> | 0.33       | <b>12.18</b> | <b>3.81</b>  | <b>0.67</b> | <b>12.54</b> | <b>6.61</b>  | <b>0.67</b> | <b>1.25</b> | <b>0.96</b> |             |             | --          |             |             | --          |
| <b>Nitrógeno total</b>             | <b>40</b>             | 1.345             | 18.967       | 7.658                   | 0.984      | 6.836       | 3.046       | 1.018      | 19.582       | 7.201        | 0.718       | 26.305       | 9.432        | 0.872       | 4.942       | 2.787       | 0.98        | 0.98        | 0.98        | 1.913       | 1.913       | 1.913       |
| <b>Sólidos suspendidos totales</b> | <b>75</b>             | 5                 | 370          | 128.3                   | 7          | 44          | 19.5        | 6          | 53           | 19           | 9           | 15           | 11.333       | 5           | 54          | 29.5        |             |             | --          | 17          | 17          | 17          |

Fuente: OCAVM, 2015

En la Tabla 17, se reportan los resultados de los parámetros más comúnmente utilizados para diseño de tecnologías de tratamiento de agua, así como los valores de fosfatos, nitrógeno total Kjeldahl, N-Nitratos, N-nitritos, y nitrógeno amoniacal. Los valores de metales se omiten por estar dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

En todos los puntos, se obtuvo un valor de coliformes fecales mayores a 2,400 NMP/100 mL.

**Tabla 18.- Escenario 1. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de la PLA**

| Parámetro              | Influente (mg/L) | Salida PLA mín (mg/L) | Salida PLA máx (mg/L) | NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|------------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>DBO<sub>5</sub></b> | 250              | 37.5                  | 12.5                  | 75                    |
| <b>PT</b>              | 10               | 9                     | 7.5                   | 20                    |
| <b>NT</b>              | 40               | 36                    | 28                    | 40                    |
| <b>SST</b>             | 200              | 180                   | 170                   | 75                    |

**Tabla 19.- Escenario 2. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de la combinación PLA-HA**

| Parámetro  | Influente (mg/L) | Salida PLA mín (mg/L) | Salida PLA máx (mg/L) | Salida HA mín (mg/L) | Salida HA máx (mg/L) | NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>DBO</b> | 250              | 37.5                  | 12.5                  | 24.375               | 2.25                 | 75                    |
| <b>PT</b>  | 10               | 9                     | 7.5                   | 4.5                  | 0.45                 | 20                    |
| <b>NT</b>  | 40               | 36                    | 28                    | 10.8                 | 7                    | 40                    |
| <b>SST</b> | 200              | 180                   | 170                   | 36                   | 25.5                 | 75                    |

**Tabla 20.- Escenario 3. Intervalo de valores de remoción de contaminantes de los HA**

| Parámetro              | Influente (mg/L) | Salida HA mín (mg/L) | Salida HA máx (mg/L) | NOM-001-SEMARNAT-1996 |
|------------------------|------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>DBO<sub>5</sub></b> | 250              | 162.5                | 45                   | 75                    |
| <b>PT</b>              | 10               | 5                    | 0.6                  | 20                    |
| <b>NT</b>              | 40               | 12                   | 10                   | 40                    |
| <b>SST</b>             | 200              | 40                   | 30                   | 75                    |

Como se observa, en los tres escenarios se cumple con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996, sin embargo, en el escenario 2, se obtienen los valores más bajos de contaminantes.

En el escenario 1, se obtienen los valores más altos de nutrientes que favorecen la eutroficación, debido a que el proceso de lodos activados no es eficiente en estos parámetros. En el escenario 3, los valores más bajos de presencia de éstos. En la siguiente sección se analiza el costo de ello.

Debido a que ninguna norma regula los valores de contaminantes para el control de la eutrofización, se retoman los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (1) (S.E.D.U.E., 1989), los cuales no se abrogaron con la publicación de la

NOM-001-SEMARNAT-1996, además de que éstos son de naturaleza distinta a las NOM'S como lo señala la propia LGEEPA en el artículo 3 fracción X.

*En los CE-CCA se señala que "para poner en práctica la política ecológica en la materia, resulta fundamental definir los criterios ecológicos de calidad del agua, con este marco de referencia, en el que se precisan los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos como son color, olor o sabor, potencial de hidrógeno y sus niveles permisibles, las autoridades competentes podrán calificar a los cuerpos de agua, como aptos para ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contado primario, para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en la acuacultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Dichos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados".*

Adicionalmente el objetivo de los CE-CCA es el de ser observados en la "*aplicación de la política general de ecología y que, uno de los asuntos al que se le otorga especial atención dentro de dicha política, es el aprovechamiento racional y la prevención y control de la contaminación del agua, así como la protección de la flora y la fauna acuáticas.*" (S.E.D.U.E., 1989).

Es por ello, que el análisis que se realiza en este trabajo, considera el valor propuesto por los CE-CCA y no los valores de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

### **IV.3 Análisis costo-beneficio**

Con base en los datos anteriores, se realizó el ACB en cada escenario, ya que en cada escenario, los valores de los parámetros de los contaminantes se encuentran por debajo de los valores de la NOM-001-SEMARNAT-1996, para la valoración de las tecnologías, se tomará como referencia el valor del fósforo en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECCA) para controlar la eutroficación acelerada, el cual en ríos y arroyos es de 0.1 mg/L (CE-CCA-001/89).

Para este análisis se consideran los costos de inversión y operación de cada tecnología. Los beneficios se evalúan en función de la variable que es posible medir directamente, la cual es actividades turísticas en la Presa Valle de Bravo (Figura 34).

Se toma como referencia los datos del costo de las tecnologías del año que se tienen disponibles y se actualizan hacia el año 2017, con el objetivo de hacerlas comparables como si no estuviera construida aún, en el caso de la PLA.

#### IV.3.1 Costos de inversión

Debido a que no fue posible tener acceso a la información del costo de inversión de la PLA, se realizó un estimado con base en el índice generado por Mantilla-Morales, *et al.* (2004), el cual se construyó con base en información recopilada sobre los costos de inversión, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales construidas entre 1991 y 2002 en México.

Básicamente la ecuación para el cálculo de los costos de inversión de las plantas de lodos activados hacia el 2002, se basa en el caudal que se pretende trate la planta, en este caso es de 18 LPS:

$$Costo_{inv} = 1032.4 * Q_0^{0.6843}$$

La actualización se realizó con el Índice Nacional de Precios al Productor (INPP) del sector construcción, debido a la naturaleza de los proyectos (Tabla 21).

**Tabla 21.- INPP de los años requeridos para la actualización de costos**

| <b>Año</b>  | <b>Valor INPP</b> |
|-------------|-------------------|
| <b>2001</b> | 51.63             |
| <b>2004</b> | 60.95             |
| <b>2006</b> | 69.11             |
| <b>2010</b> | 88.63             |
| <b>2013</b> | 99.33             |
| <b>2015</b> | 104.75            |
| <b>2016</b> | 108.73            |
| <b>2017</b> | 123.01            |

Fuente: INEGI, 2017a

Los valores tomados son los de los meses de Febrero de cada año

El costo de inversión de la PLA se considera hacia el año 2004, año en que inició su construcción (Tabla 22).

**Tabla 22.- Costos de inversión (escenario 1)**

| PLA                       |                          |
|---------------------------|--------------------------|
| Año                       | Costo de inversión (MXN) |
| <b>Cálculo 2001</b>       | 9,375,000                |
| <b>Actualización 2004</b> | 11,066,011               |
| <b>Actualización 2017</b> | 22,334,528               |

Para el caso del humedal artificial, se utilizan los datos proporcionados por el OCAVM del año 2015 y se realiza la actualización hacia el año 2017 (Tabla 23).

**Tabla 23.- Costo de inversión para la instalación de humedales artificiales (escenario 3)**

| Humedales artificiales                                  |                   |                   |
|---|-------------------|-------------------|
| Concepto  | Costo 2015 (MXN)  | Costo 2017 (MXN)  |
| <b>Obras exteriores (acondicionamiento del terreno)</b> | 9,253,531         | 10,866,212        |
| <b>Obras para el Influyente y efluente</b>              | 596,656           | 700,639           |
| <b>Sedimentador</b>                                     | 789,889           | 927,549           |
| <b>Humedales</b>  | 36,470,085        | 42,825,996        |
| <b>Total</b>  | <b>47,110,160</b> | <b>55,320,396</b> |

Fuente: OCAVM, 2015

En el caso del escenario 2, no se considera el monto del sedimentador del escenario 3, debido a que la PLA ya cuenta con esta infraestructura (Tabla 24).

**Tabla 24.- Costo de inversión para combinación la PLA-HA (escenario 2)**

| PLA-HA                                    |                   |
|---|-------------------|
| Concepto                                  | Costo 2017 (MXN)  |
| <b>HA (sin la obra del sedimentador)*</b> | 54,392,848        |
| <b>Obras de acoplamiento</b>              | 1,357,568         |
| <b>Total</b>                              | <b>55,750,416</b> |

\*No se considera el valor del sedimentador, puesto que se aprovecharía la infraestructura existente de la PLA

#### IV.3.2 Costos de operación y mantenimiento

Para la PLA se considera como máximo el dato proporcionado por el Secretario del ayuntamiento de Amanalco (entrevista 22 de noviembre de 2016), y como mínimo el dato proporcionado por CAEM, en la Tabla 25 se muestran estos valores y en la Tabla 26 los correspondientes al mantenimiento (SAIMEX, 2017).

**Tabla 25.- Costos de operación de la PLA**

| Concepto                 | Costo (MXN/periodo de tiempo) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Operación mensual mínimo | 57,500                        |
| Operación mensual máximo | 100,000                       |
| Operación anual mínimo   | 690,000                       |
| Operación anual máximo   | 1,200,000                     |

Fuente: Secretario del ayuntamiento de Amanalco, 2016; SAIMEX, 2017

**Tabla 26.- Costos de mantenimiento de la PLA**

| Mantenimiento PLA      |                 |
|------------------------|-----------------|
| Años de rehabilitación | Costo (MXN/año) |
| 2013                   | 365,426*        |
| 2016                   | 400,000         |
| 2017                   | 452.523         |

Fuente: SAIMEX, 2017

\*Calculado con base en dato del año 2016 proporcionado por CAEM

En cuanto a la operación y mantenimiento de los humedales artificiales sólo se requiere poda de la vegetación, para ello se estiman 3 personas con un sueldo de \$6,000 MXN/mes, en la Tabla 27 se observan los costos.

**Tabla 27.- Operación y mantenimiento de los HA**

| Operación y mantenimiento HA |                               |
|------------------------------|-------------------------------|
| Operación                    | Costo (MXN/periodo de tiempo) |
| Mensual                      | 18,000                        |
| Anual                        | 216,000                       |

Los monitoreos de cumplimiento de la calidad de agua, no se consideran, ya que el monto es el mismo para los tres escenarios.

En la Tabla 28 se muestran los valores de cada escenario:

**Tabla 28.- Costos de operación y mantenimiento de cada escenario**

| Escenario | Operación mínimo (MXN/año) | Operación máximo | Mantenimiento (MXN/cada 5 años) |
|-----------|----------------------------|------------------|---------------------------------|
| 1         | 690,000                    | 1,200,000        | 400,00                          |
| 2         | 906,000                    | 1,416,000        | 400,00                          |
| 3         | 216,000                    | 216,000          | ---                             |

### IV.3.3 Beneficios

Los servicios ambientales que el río Amanalco provee directamente a la cuenca son muchos, entre ellos: provisión de agua para riego agrícola, en algunas comunidades

provisión de agua para efectuar actividades cotidianas (lavado de ropa, etc.), agua para ganado, entre otros. De forma indirecta, es el principal aporte a la Presa Valle de Bravo, por lo que es una fuente de recursos económicos, debido al turismo.

El turismo en Valle de Bravo es la principal actividad económica, este municipio se posiciona como el principal destino turístico en el Estado de México, con reconocimiento a nivel nacional e internacional, y una afluencia turística importante (Peñaloza, Villareal y Martínez, 2011). El proceso que da origen al surgimiento de la actividad turística en el municipio, inició con la construcción de la presa, la cual ha sido eje central para el desarrollo de esta actividad (López, Villareal, Contreras y Salvatierra, 2016).

Para realizar el cálculo del costo de la recreación, se toman los datos reportados de la Secretaría de Turismo (SECTUR). Debido a que se tiene información hasta el año 2014, se utiliza el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) para obtener la actualización al año 2017. En la Tabla 29 se muestra el valor de los INPC que se utilizaron para los diversos cálculos de actualización.

**Tabla 29.- INPC de los años requeridos para la actualización de costos**

| <b>Año</b>   | <b>INPC</b> |
|--------------|-------------|
| <b>2010</b>  | 97.66       |
| <b>2012*</b> | 103.31      |
| <b>2014</b>  | 108.18      |
| <b>2017</b>  | 116.90      |

Fuente: INEGI, 2017b

Se consideran los valores de los meses de febrero

\*Este valor corresponde al mes de junio

SECTUR reporta los siguientes datos para el año 2014 (Tabla 30):

**Tabla 30.- Derrama económica en el municipio debido al turismo**

| <b>Concepto</b>                           | <b>Valor</b>         |
|---|----------------------|
| Turistas totales (personas/año)           | 95,458               |
| Gasto promedio turistas (MXN/día/persona) | 2,000                |
| Estadía promedio (días/año)               | 8                    |
| Beneficio (MXN/anual)                     | <b>1,527,328,000</b> |

Fuente: Elaborado con base en SECTUR, 2014

Para la actualización de la derrama económica, se considera que se mantienen la misma tasa de afluencia turística que en el año 2014 (Tabla 31).

**Tabla 31.- Actualización de la derrama económica hacia el 2017**

| <b>Derrama económica por recreación</b> |               |               |
|---|---------------|---------------|
| <b>Año</b>                              | <b>2014</b>   | <b>2017</b>   |
| Beneficio (MXN/anual)                   | 1,527,328,000 | 1,650,307,488 |

En el año 2012, ocurrió un florecimiento de algas que desembocó en el cierre de la Presa, lo que ocasionó la prohibición de deportes acuáticos como esquí, motosquí y natación, así como cierre para la operación de embarcaciones de motor (La Jornada, 2012). La pérdida económica de esa acción durante dos semanas ascendió a tres millones de pesos (El Universal, 2012). En la Tabla 32 se muestran los valores del cálculo de la pérdida económica, extrapolando a un año el valor antes mencionado y actualizado hacia el año 2014, año base para el cálculo de la derrama económica.

**Tabla 32.- Pérdida económica extrapolada del año 2012 y actualización hacia el 2014 y 2017**

| <b>Pérdida económica</b> |                        |
|--------------------------|------------------------|
| <b>Año</b>               | <b>Valor (MXN/año)</b> |
| 2012                     | 78,000,000             |
| 2014                     | 88,258,960             |
| <b>2017</b>              | <b>95,365,517</b>      |

Fuente: Elaborado con base en El Universal, 2012

Es decir, del beneficio económico total por turismo, aproximadamente el 6% se puede considerar que se debe directamente a la calidad del agua en la Presa.

Para realizar la evaluación considerando la capacidad de depuración de nutrientes de las tecnologías, se construye un indicador con base en el valor de los CECCA de 0.1 mg/L para fosfatos (medidos como fósforo total) para control de la eutrofización en ríos.

Para la construcción del indicador se tiene en cuenta la capacidad de autodepuración del río Amanalco, el cual es función de su caudal y del oxígeno disuelto en él, los valores considerados se observan en la Tabla 33.

El indicador se construyó como se muestra a continuación:

$$IVT = \left( \frac{PT_{CECCA}}{PT_{no\ removido}} \right) (Q_p)(OD_p)(P_Q)$$

Donde:

*IVT*, Indicador de valoración de cada tecnología

*PT<sub>CECCA</sub>*, valor de fósforo permitido en ríos por los CECCA ( $0.1 \frac{mg}{L}$ )

*PT<sub>no removido</sub>*, valor de fósforo no removido por cada tecnología

*Q<sub>p</sub>*, Caudal promedio del río Amanalco

*OD<sub>p</sub>*, Oxígeno disuelto en el río Amanalco (se toma el dato de la desembocadura a la Presa Valle de Bravo)

*P<sub>Q</sub>*, Proporción de tratamiento en flujo de cada tecnología

**Tabla 33.- Valores de los caudales y oxígeno disuelto en el río Amanalco en un año**

| Mes             | Oxígeno disuelto (mg/L) | Caudal ( $10^6$ m <sup>3</sup> /año) |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Enero           | 7.5                     | 0.12                                 |
| Febrero         | 10.23                   | 0.14                                 |
| Marzo           | 9.83                    | 0.15                                 |
| Abril           | 7.5                     | 0.1                                  |
| Mayo            | 5.9                     | 0.21                                 |
| Junio           | 9.16                    | 0.28                                 |
| Julio           | 10.23                   | 0.27                                 |
| Agosto          | 6.52                    | 0.3                                  |
| Septiembre      | 5.72                    | 0.4                                  |
| Octubre         | 8.63                    | 0.3                                  |
| Noviembre       | 3.51                    | 0.19                                 |
| Diciembre       | 6.29                    | 0.16                                 |
| <b>Promedio</b> | <b>7.59</b>             | <b>0.22</b>                          |

Fuente: elaborado con base en Figueroa-Sanchez, Sarma y Sarma, 2014; Quintanilla-Terminel, 2012

En la Tabla 34 se observa el valor de los indicadores en cada escenario:

**Tabla 34.- Valor de los indicadores de remoción de fósforo**

| Escenario | Valor mínimo | Valor máximo |
|-----------|--------------|--------------|
| PLA       | 0.0552       | 0.0662       |
| PLA-HA    | 0.0368       | 0.4416       |
| HA        | 0.0331       | 0.3312       |

Los datos anteriores son para el cálculo del tratamiento de agua en general, sin embargo si el tratamiento se realiza con humedales artificiales, éstos proveen de otros servicios. Ghermandi, Van Den Bergh, Brander, de Groot, y Nunes (2010), realizaron un meta-análisis de los costos de los servicios ambientales reportados por diversos autores en el mundo para humedales artificiales (Tabla 35).

**Tabla 35.- Valores reportados de los beneficios de algunos servicios ambientales que proveen los HA**

| <b>País</b>           | <b>Servicio ambiental</b>  | <b>Valor beneficio (USD/ha/año)</b> | <b>Método</b>                               |
|-----------------------|--|-------------------------------------|---|
| <b>Suecia</b>         | Reutilización de agua proveniente de la agricultura                            | 4,080                               | Costo de reemplazo                          |
| <b>España</b>         | Reutilización de agua proveniente de la agricultura                            | 78,321                              | Costo de viaje                              |
| <b>China</b>          | Reducción de la eutroficación de agua y reutilización en un estanque de ornato | 294,729 - 8,013,754                 | Valoración contingente y costo de reemplazo |
| <b>Estados Unidos</b> | Provisión de hábitat para la vida silvestre                                    | 9,352                               | Valoración contingente                      |
| <b>China</b>          | Provisión de hábitat para la vida silvestre                                    | 151,830                             | Valoración contingente                      |
| <b>Reino Unido</b>    | Protección contra inundaciones   | 8,201                               | No reportado                                |
| <b>Alemania</b>       | Remoción de nutrientes y mejoramiento de la biodiversidad                      | 114 - 2,066                         | No reportado                                |
| <b>Holanda</b>        | Servicios culturales   | 295                                 | No reportado                                |
| <b>Reino Unido</b>    | Servicios culturales   | 3,903                               | No reportado                                |
| <b>Grecia</b>         | Conservación y mejoramiento de hábitat   | 27,678                              | No reportado                                |
| <b>Nueva Zelanda</b>  | Conservación y mejoramiento de hábitat   | 197                                 | No reportado                                |

Fuente: Ghermandi, Van Den Bergh, de Groot y Nunes, 2010

En el caso de los HA para tratar el agua del río Amanalco, éstos proveerían de diversos servicios ambientales a la cuenca, el que se considera para el ACB es la provisión de hábitat para la vida silvestre, debido a que en campo se observaron diversas aves, además de que hace menos de un siglo, en la zona existía un ecosistema lagunar.

Con base en los datos de la Tabla 35, se considera el valor del servicio de provisión de hábitat para la vida silvestre y otros valores reportado para China (realizado por Yang *et al*, 2008), ya que se trata de un humedal artificial para control de la eutrofización.

Debido a que el valor es del año 2010, en la Tabla 36 se muestra la actualización y conversión a pesos mexicanos. Dicho valor, también está en función del área del HA, el cual es de 9611 m<sup>2</sup> (0.9611 hectáreas).

El tipo de cambio dólar - peso utilizado es el promedio del año 2010, el cual es de 12.63 MXN por cada USD (Banco de México, 2017a).

**Tabla 36.- Valor del servicio ambiental considerado para la valoración de beneficios proporcionados por HA en la cuenca**

| Año   | 2010              | 2010              | 2017              | 2017                          |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| Servicio ambiental                          | Valor USD/ha/año) | Valor MXN/ha/año) | Valor MXN/ha/año) | Valor HA Amanalco MXN/ha/año) |
| Provisión de hábitat para la vida silvestre | 151,830           | 1917414.617       | 2,295,188         | 2,205,905                     |

#### IV.3.4 Resultados integrados del ACB

En todos los escenarios se considera una tasa de descuento del 6.5%, la cual es la tasa de rendimiento de los certificados de la tesorería (CETES) en febrero de 2017, ya que estos instrumentos constituyen un mecanismo de ganancia mínima y segura para los inversionistas, es decir, el valor mínimo que se puede obtener al invertir en el banco (Banco de México, 2017b).

En la Tabla 37 se muestran los indicadores de viabilidad de cada escenario:

**Tabla 37.- Tabla resumen resultados ACB**

| Escenario | VAN         |            | TIR    |        |
|-----------|-------------|------------|--------|--------|
|           | Máximo      | Mínimo     | Máximo | Mínimo |
| 1 PLA     | 33.389.183  | 29.443.876 | 22,28% | 19,69% |
| 2 PLA-HA  | 416.335.870 | -3.417.700 | 76,92% | 5,72%  |
| 3 HA      | 314.637.851 | 1.408.635  | 60,69% | 6,82%  |

En la

Tabla 38 se reportan los resultados obtenidos sin considerar el valor de los servicios ambientales:

**Tabla 38.- Tabla resumen resultados ACB sin considerar el valor de los servicios ambientales**

| Escenario | VAN         |             | TIR    |        |
|-----------|-------------|-------------|--------|--------|
|           | Máximo      | Mínimo      | Máximo | Mínimo |
| 1 PLA     | 33.389.183  | 29.443.876  | 22,28% | 19,69% |
| 2 PLA-HA  | 392.030.087 | -27.723.483 | 72,96% | -0,86% |
| 3 HA      | 290.332.067 | -22.897.148 | 56,70% | 0,60%  |

Los valores máximos y mínimos contemplan los costos de operación y porcentajes de remoción de fósforo de las tecnologías.

Si no se considera en ningún escenario el valor de la recreación, todos los escenarios resultan financieramente inviables.

Al integrar los porcentajes de remoción de fósforo de cada tecnología, el escenario 1 resulta tener el valor más bajo de rentabilidad en los valores máximos de costos de operación y remoción de fósforo. La combinación PLA-HA es la más favorecido en la valoración máxima, mientras que en el rango mínimo es la PLA la de mayor rentabilidad.

En el caso de la valoración sin considerar el valor de los servicios ambientales de los HA, el escenario PLA-HA resulta financieramente inviable en la valoración mínima.

En el anexo 4 se presentan los resultados completos de cada escenario.

#### **IV.4 Discusión de resultados**

Actualmente en el área de estudio -que es parte de una cuenca estratégica para la Ciudad de México- existen diversos actores, una estrecha relación entre el sistema ecológico y el social, así como una deficiente operación de la infraestructura de tratamiento, en la Figura 36, se recopilan estos elementos dentro del MTF, como se observa, los factores sociales, ambientales, de gestión de los recursos y de infraestructura se encuentran completamente interrelacionados, por lo que para lograr una adecuado manejo de los recursos, es indispensable pensar en una gestión integral que permita tener en cuenta todos los elementos que influyen en la conservación de los recursos naturales y de las comunidades que habitan la zona.

Actualmente, la provisión de agua a las ciudades de México y Toluca, ha sido el principal motivo por el cual las autoridades del orden de gobierno federal han delineado diversas líneas de acción para atender el problema de eutrofización del principal cuerpo de agua de la cuenca (Presa Valle de Bravo), sin embargo no se han contemplado las realidades sociales y los otros factores involucrados, lo cual ha desembocado en el actual estado trófico de los cuerpos de agua.

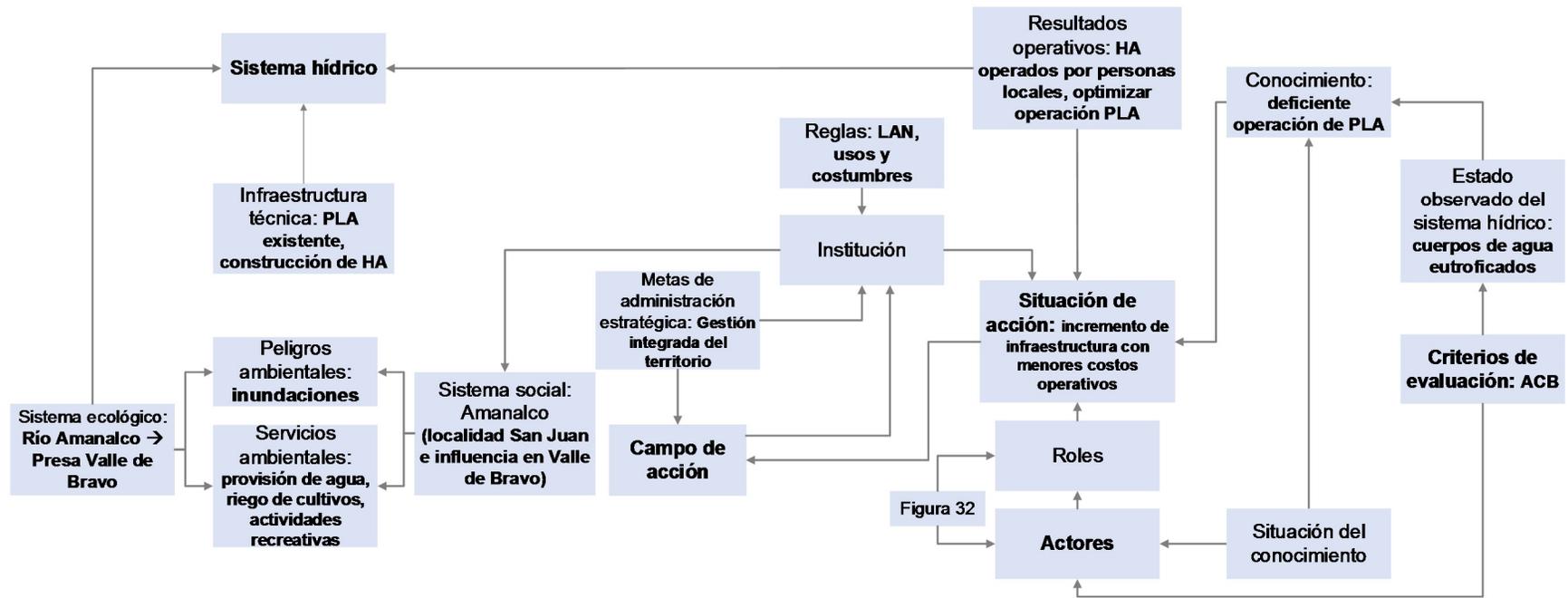


Figura 36.- Análisis del caso de estudio de acuerdo con el MTF

Debido a que el proceso de eutroficación de la presa es multifactorial, realizar acciones únicamente en el embalse no es suficiente, como lo menciona Cotler (2004) es necesaria una visión más integral, que permita entender las interrelaciones entre los recursos naturales, la forma de organización de la población local para apropiarse de ellos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad de éstos.

En lo que concierne a los recursos hídricos, la disponibilidad y calidad de éstos dependen de la salud de los bosques y de las acciones emprendidas por los habitantes en la cuenca alta y media que afectan a la parte baja. Asimismo, las personas en la cuenca dependen de la calidad de los cuerpos de agua, por lo que el tratamiento posterior a la utilización en actividades antropogénicas, resulta de vital importancia.

No obstante lo anterior, hasta ahora, en la cuenca no se contempla el tratamiento del agua como parte del derecho humano al agua, a pesar de ser una vital arista para asegurar ecosistemas en buen estado que permitan proveer de bienestar.

A pesar de que el tratamiento del agua, está reconocido en la Constitución política, como obligación de los municipios, bajo el principio de que es responsabilidad de quien la contamina, tratarla, hasta el momento ha resultado contraproducente, ya que este nivel de gobierno en Amanalco y en otros municipios del país, no tienen forma de solventar los costos operativos.

La deficiencia en el tratamiento del agua, se refleja en la infraestructura de tratamiento construida por el gobierno federal, a través de fondos provenientes de financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo por medio de los diversos esquemas tales como PROSSAPYS (con el que fue rehabilitada la PLA) y no operada por el nivel municipal, con lo que literalmente se pierde la inversión realizada. Ello deja ver un grave problema que se relaciona más con las capacidades económicas de los actores que con las soluciones de ingeniería.

En el caso del tratamiento del agua municipal, diversos actores como la CCVBA y el CCMSS, vislumbran los humedales artificiales (HA) como la opción factible para realizarlo en la cuenca. Lo que se requiere es apoyo de instituciones como CAEM, la cual ha colocado colectores en algunas comunidades de la cuenca, la idea es aprovechar esa infraestructura y hacerla más eficiente. Una barrera para la instalación de HA, es que no generan ingresos para la empresas operadoras (entrevista a coordinación del CCMSS y gerencia operativa del CCVBA, 22 de noviembre de 2016).

El municipio de Amanalco también ve factible la opción de utilizar HA para el tratamiento del agua, previa descarga al río Amanalco, por diversas causas (entrevista con el secretario de Ayuntamiento de Amanalco, 22 de noviembre de 2016):

- Los HA pueden utilizarse en diversas comunidades en mejor convivencia con la naturaleza y puede mejorar la calidad del agua del río a largo plazo
- Los costos operativos son muy bajos en comparación con la PLA actual, cuyos costos oscilan entre 80,000-100,00 MXN/mensuales. Para el municipio operar la actual planta es insostenible, aproximadamente representa el 10% de sus ingresos.

La instalación de HA en la cuenca, potencialmente haría que el municipio se encuentre en condiciones de cumplir con las leyes formales al responsabilizarse del tratamiento de agua municipal.

Por otra parte, desde el punto de vista de la ingeniería es posible hacerles frente a los problemas que representa la topografía del terreno, para la instalación de los colectores y la conexión hacia la PLA, sin embargo, las opciones que se implementen si sólo abordan esta arista sin tener presente los demás factores de la cuenca, posiblemente no funcionen como las otras PTAR de la cuenca, que se mantienen sin operar o en operación deficiente.

Por tanto, para hacerle frente a la eutroficación de la presa Valle de Bravo, no basta con la operación eficiente de las tecnologías de tratamiento, el problema tiene causas complejas, por lo que la solución no puede ser reducida a una panacea, como lo es pensar que con la instalación de una planta será resuelto. Es indispensable tener presente a los habitantes de la cuenca, entender sus necesidades para proponer líneas de acción que lleven hacia una menor presión sobre los recursos naturales, tales como reconversión de la agricultura, manejo adecuado de los bosques (para evitar la erosión del suelo), sensibilización de los habitantes de la parte alta y media de la cuenca.

En ese sentido, las acciones que actualmente desarrollan asociaciones civiles como el CCMSS y Procuenca, son de vital importancia, porque demuestran un entendimiento de los factores sociales y económicos que conducen a presionar negativamente los recursos naturales de la cuenca. La forma de medir, los impactos que éstas asociaciones civiles tienen en la cuenca, es a través del incremento del número de personas que han reconvertido sus prácticas agrícolas (sumados en

área de terreno), familias que han instalado y usan baños secos, así como tasa de pérdida de la cobertura forestal.

Asimismo, algunos habitantes de la cuenca alta, perciben que la contaminación que se vierte en esa zona, afecta a las personas de la cuenca media y baja, sin embargo, no existen incentivos para revertir la situación, por ejemplo, consulta para la instalación de colectores de agua y pagos de multas por vertido de contaminantes (como sí existen sanciones para quienes no participan en el mantenimiento de la infraestructura de agua potable).

En la cuenca, los habitantes perciben disminución de la calidad y cantidad de agua del río Amanalco, algunos agricultores perciben que la mala calidad del agua del río se debe a la utilización de agroquímicos. En tanto que el problema de eutroficación de la presa no se relaciona directamente con la calidad del río Amanalco.

En lo que concierne al ACB, éste muestra que al tener presente los valores de remoción de fósforo (principal causa de la eutroficación de cuerpos de agua), los beneficios del tratamiento del agua (medidos indirectamente a través de la derrama económica que se pierde por el cierre de la Presa, asociado a la recreación) y el valor de los servicios ambientales que proveen los humedales artificiales (sólo se consideró provisión de hábitat para la vida silvestre), la construcción y operación de la PLA resulta tener el valor más bajo de rentabilidad, la combinación PLA-HA es la más favorecida en la valoración máxima, mientras que en el rango mínimo es la PLA la de mayor rentabilidad.

Lo anterior, permite ver que la operación eficiente que permita los mayores porcentajes de remoción de contaminantes, es rentable en cualquiera de los tres escenarios, pero es mayor cuando se combinan las tecnologías.

La evaluación que se realizó, considera que ninguna tecnología está construida (con el objetivo de estar en condiciones de hacer la comparación de costos y beneficios), sin embargo en la realidad la PLA entró en operaciones en el 2006, se opera inadecuadamente sin bitácoras de operación, muestra que el problema del tratamiento del agua es muy complejo, no por cuestión tecnológica, sino debido al actuar de diversos actores en el tema, las leyes formales actuales, la falta de una estrategia integral de manejo de la cuenca, en la que se considere al tratamiento como un eje y no como la panacea que resolverá el proceso de pérdida de calidad de los recursos hídricos.

## V CONCLUSIONES

Con base en lo expuesto a lo largo del desarrollo del documento, se concluye lo siguiente:

La cuenca Valle de Bravo-Amanalco es sólo el reflejo de una parte de la “gobernanza” sobre los recursos hídricos en el país, se trata del nulo entendimiento de la estrecha relación entre el sistema ambiental y el social, lo que ha devenido en que las acciones implementadas por los tomadores de decisiones no reviertan la situación de deterioro de los recursos naturales.

Esta cuenca, al formar parte del sistema Cutzamala, es de interés para el orden de gobierno federal, en tanto que se cumplan los parámetros de descarga de la NOM-001-SEMARNAT-1996, ya que ello podría abaratar costos en la potabilización, sin embargo, concebir únicamente el tratamiento de agua como la solución al deterioro de la calidad de los cuerpos hídricos, desemboca en la construcción de 14 PTAR que operan de forma deficiente porque en la ingeniería no se consideran las realidades sociales.

Es imperativo diseñar una estrategia de manejo, para tomar decisiones con base en el entorno integral y no sólo dentro de las competencias de cada autoridad. Es así como lo exige el problema de eutrofización, ya que éste es multifactorial y no se limita únicamente a los factores ambientales o biogeoquímicos del ecosistema, sino que tiene una estrecha relación con las situaciones sociales y los cambios que se generaron en el ambiente desde la construcción del sistema hidroeléctrico Miguel Alemán (hoy sistema Cutzamala).

Dicha estrategia de manejo integrado de la cuenca requiere contemplar los siguientes aspectos:

- El entorno físico y la estrecha relación local de los habitantes de la zona con éste.
- La adecuada tecnología de monitoreo constante de los parámetros de contaminación en los cuerpos de agua, tales como nitrógeno total, fósforo total, sólidos disueltos totales, DBO, huevos de helminto y no únicamente coliformes totales, como lo han realizado hasta ahora las asociaciones civiles analizadas.

- Realizar la calendarización de monitoreo en acuerdo con los actores involucrados (asociaciones civiles, CONAGUA, Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, etc.).
- Es necesario medir la tasa de pérdida de cobertura forestal y su impacto en la pérdida de suelo.
- Reconversión de la agricultura, para evitar el uso excesivo de fertilizantes, así como arrastre de sedimentos a los cuerpos de agua.
- Planeación que considere las diversas visiones de los habitantes de la cuenca.
- Realización de una agenda que considere la reunión periódica de los representantes de los tres niveles de gobierno, usuarios del agua y demás actores interesados.
- Difusión de los resultados de las acciones efectuadas, entre los tres niveles de gobierno, así como usuarios del agua, habitantes de la cuenca y otros actores involucrados, para tomar decisiones con base en información actualizada.
- Mejora de la operación de las tecnologías de tratamiento de agua, así como monitoreo constante de su desempeño.

El tratamiento del agua es sólo un punto que se debe atender en la cuenca, sin embargo se requiere modificar la agricultura actual (extensiva), mejorar los medios de producción de la industria acuícola, generar un plan de monitoreo de cumplimiento de los diversos actores que descargan al río y la Presa, así como mantener un plan de monitoreo de los cuerpos de agua de la cuenca -que permita la toma de decisiones informada- son acciones que se requieren emprender coordinadamente entre los diversos actores interesados, desde la CAEM, CONAGUA, los organismos de cuenca, las asociaciones civiles y los habitantes de la cuenca.

Es indispensable que los actores involucrados desempeñen los roles asignados por reglas formales e informales, y que además de ello se mantengan a una apertura de diálogo, transparencia total en la ejecución de recursos económicos y resultados de las acciones implementadas, etc., porque hasta el momento la postura hermética de la CAEM ha sido un obstáculo para lograr la eficiente operación de la infraestructura de tratamiento y optimización de ésta a partir de propuestas como la instalación de HA en la cuenca.

La falta de información sobre los beneficios, costos, normas compartidas y oportunidades son variables determinantes que afectan la decisión de los individuos para cambiar las reglas establecidas, en este caso la construcción de PTAR que a

largo plazo no funcionan, porque no se considera la capacidad económica del municipio, la topografía de los lugares de instalación de las tecnologías así como los aspectos sociales de la zona, tales como organización local, formas de obtención de recursos económicos, entre otros.

En el ACB se utiliza como parámetro de evaluación y referencia el valor de los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, debido a que en ninguna norma se consideran valores para el control de la eutrofización, a pesar de que los objetivos de la NOM-001-SEMARNAT-1996 son regular la concentración los contaminantes en las descargas.

Por lo que existe un “vacío legal” en este tema, puesto que los CE-CCA no fueron abrogados por la NOM-001-SEMARNAT-1996, pero tampoco en ésta se señalan los valores máximos de contaminantes para control de la eutrofización ni especifica los criterios ecológicos señalados en la LGEEPA.

El ACB, con las consideraciones tomadas, muestra que teniendo en cuenta únicamente la derrama económica por el buen funcionamiento de la Presa, como proveedora de servicios de recreación, permite que sea financieramente factible invertir en tecnologías de tratamiento en la cuenca, con miras a la mejora de los cuerpos de agua. Sin embargo, sin tener en cuenta el valor de este beneficio ninguno de los escenarios planteados es viable, en ese sentido considerar un valor monetario, a través de los servicios ambientales, permite otorgarles un incentivo para su implementación.

El considerar las reglas no formales de organización de las comunidades, el fomento de la activa participación de éstas, la creación de espacios de diálogo entre los habitantes de la cuenca que dependen directamente de los recursos hídricos de la zona, y los representantes de las instituciones de los tres niveles de gobierno, además del fomento a la apropiación de dicha tecnología por parte de las comunidades, son potencialmente los factores que permitirán la instalación de HA como una tecnología de tratamiento del agua residual generada en la cuenca.

Los factores antes descritos son de vital importancia para la implementación de acciones de gestión integral de los recursos que permitan restaurar al menos las condiciones de funcionalidad de los cuerpos de agua en la zona, dichos factores no deberían restringirse únicamente a las condiciones de operación de la planta, sino que se vislumbran como alternativas de solución integral a los problemas de contaminación de la cuenca Valle de Bravo-Amanalco.

## VI RECOMENDACIONES

Con base en la investigación que se realizó en el presente trabajo, se recomienda que la política pública que se desarrolla en torno al tema del agua, sea integral, en la que se consideren los aspectos sociales locales, el entorno ambiental, las condiciones de la infraestructura para el abastecimiento y saneamiento de los recursos hídricos, así como las capacidades económicas de los municipios y de los organismos operadores, con el objetivo de lograr una mejor gestión del agua y con ello asegurar el cumplimiento del artículo 4° constitucional, así como los diversos acuerdos internacionales que México ha firmado.

Actualmente está en proyecto la aprobación de una nueva ley de aguas, que sustituya la actual Ley de Aguas Nacionales y que le otorgue un carácter de general a este instrumento legal, lo cual la pondría al mismo nivel normativo que la Ley General del Equilibrio Ecológico, por mencionar alguna, dicha nueva Ley puede ser la oportunidad para mejorar la gestión de los recursos hídricos y revertir la condición de deterioro de la que actualmente son objeto.

También se recomienda la sensibilización social y ambiental de los encargados de efectuar la construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento y saneamiento de agua, para darles herramientas que les permitan estar informados de la situación integral del entorno en el que desempeñarán sus trabajos y dotarlos de herramientas en la toma de decisiones que permitan la mejora de la gestión de los recursos hídricos.

Para la selección de tecnologías de tratamiento de agua, es indispensable realizar una evaluación mucho más completa que sólo los costos de inversión, se requieren considerar además de los aspectos antes mencionados, los costos de operación a largo plazo para realizar un análisis financiero o en su caso costo-beneficio, que dote a los municipios y tomadores de decisiones de mejores herramientas para seleccionar la tecnología que opere óptimamente.

---

## VII REFERENCIAS

Adrinolo, D. y Ruiz, M. (2011). Manejo y control de cianobacterias en lagos, reservorios y ríos. Alertas En Hansen, M. (coordinador). *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación.

Badejo, A. A., Omole, D. O., Ndambuki, J. M., y Kupolati, W. K. (2017). Municipal wastewater treatment using sequential activated sludge reactor and vegetated submerged bed constructed wetland planted with *Vetiveria zizanioides*. *Ecological Engineering*, 99, 525-529.

Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica*, (84), 8-15.

Banco de México. (2017a). *Sistema de información económica*. Consultado el 18 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?accion=consultarCuadro&idCuadro=CF373>

Banco de México. (2017b). *Mercado de valores (Tasas de interés)*. Consultado el 31 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.banxico.org.mx/portal-mercado-valores/>

Banco Mundial. (2015). *Diagnóstico para el manejo integral de las subcuencas Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Ordo, Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo y Villa Victoria pertenecientes al Sistema Cutzamala*. Consultado el 14 de diciembre de 2016. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/309801468189248037/pdf/99219-P150092-SPANISH-WP-PUBLIC-Box393194B.pdf>

Barzev, R. (2002). Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. Corredor biológico mesoamericano. Serie técnica 04.

Bauzá, L. y Giannuzzi, L. (2011). Métodos de control del desarrollo de floraciones cianobacterianas en ambientes acuáticos. Revisión actualizada. En Hansen, M. (coordinador). *Cianobacterias como determinantes ambientales de la salud*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Salud de la Nación.

---

Bilgin, M., Şimşek, İ., y Tulun, Ş. (2014). Treatment of domestic wastewater using a lab-scale activated sludge/vertical flow subsurface constructed wetlands by using *Cyperus alternifolius*. *Ecological engineering*, 70, 362-365.

Binder, C., Hinkel, J., Bots, P. y Pahl-Wostl, C. (2013). Comparison of frameworks for analyzing social-ecological systems. *Ecology and Society*, 18(4).

Bonfil H. y Madrid L. (2006). El pago por servicios ambientales en la Cuenca de Amanalco – Valle de Bravo. *Gaceta Ecológica*, núm 80, pp. 63-79. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Consultado el 16 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/539/53908005.pdf>

Carmona – Lara, María del Carmen. (2007). El sistema de concurrencia y la distribución de competencias en las reformas a la Ley de Aguas Nacionales. En Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM. *Régimen jurídico del agua. Culturas y sistemas jurídico comparados*. Consultado el 04 de abril de 2016. Disponible en: <http://biblio.juridicas.unam.mx/libros/libro.htm?l=2463>

CCMSS. (2015). *Curriculum vitae*. Consultado el 19 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2015/11/Curriculum-CCMSS-noviembre-2015.pdf>

CCMSS. (s. f.). *PASMIT: Pago por servicios ambientales para el manejo integrado del territorio en la Cuenca Amanalco-Valle de Bravo* [folleto].

CE-CCA-001/89. (13 de diciembre de 1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. *Diario Oficial de la Federación*. Consultado el 01 de marzo de 2017. Disponible en: [http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5\\_8080/ibi\\_apps/WFServleta0c5.html](http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/estadisticas/compendio2010/10.100.13.5_8080/ibi_apps/WFServleta0c5.html)

Centro Virtual de Información del Agua. (s.f.). *Organismos operadores. Agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Consultado el 20 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.agua.org.mx/actua/exige/organismos-operadores>

Cervantes-Sandoval A., Chiappa-Carrara X. y Dias-Marques N. (2009). *Stella, software para modelación dinámica en Biología*. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM. México

Comisión de Cuenca Valle de Bravo-Amanalco. (2014). *Instalaciones de tratamiento de aguas residuales en la Cuenca Valle de Bravo – Amanalco*.

---

CONAGUA. (2005). *Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos*. Consultado el 02 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Sistema-Cutzamala.pdf>

CONAGUA. (2007a). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía para el control de descargas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*. Consultado el 17 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/22GuiaParaElControlDeDescargas.pdf>

CONAGUA. (2007b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos*. Consultado el 03 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/49SistemasAlternativosDeTratamientoDeAguasResidualesyLodosProducidos.pdf>

CONAGUA. (2011). *Estadísticas del agua en México. Edición 2011*. Consultado el 02 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-1-11-EAM2011.PDF>

CONAGUA. (2015a). *Atlas del agua en México 2015*. Consultado el 19 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>

CONAGUA. (2015b). *Estadísticas del agua en México. Edición 2015*. Consultado el 09 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/EAM2015-ALTA.pdf>

CONAGUA. (2015c). *Manual de operación y procedimientos 2015*. Consultado en mayo de 2017. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110780/Manual\\_de\\_Operaci\\_n\\_y\\_Procedimiento\\_del\\_Programa\\_para\\_Marzo\\_20.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110780/Manual_de_Operaci_n_y_Procedimiento_del_Programa_para_Marzo_20.pdf)

CONAGUA. (2016a). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Consultado el 24 de julio de 2017. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/184667/DSAPAS\\_2016\\_web\\_Parte1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/184667/DSAPAS_2016_web_Parte1.pdf)

---

CONAGUA. (2016b). *Sistema de pronósticos en ríos. Terminología*. Consultado el 24 de julio de 2017. Disponible en: <http://app.conagua.gob.mx/spr/glosario.html>

CONAGUA. (2017). *Inventario Nacional de Humedales. Glosario general de términos*. Consultado el 20 de julio de 2017. Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/es/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-humedales-inh>

CONAGUA. (s.f.). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos de Oxidación Bioquímica con Biomasa Suspendida*. Consultado el 31 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.mapasconagua.net/previ.aspx?nm=SGAPDS-1-15-Libro33.pdf>

Consejo de Cuenca del Valle de México. (2016). *Las comisiones de cuenca*. Consultado el 17 de marzo de 2017. Disponible en: <http://ccvm.org.mx/organosAuxiliares/ccvba?s=ccvba42409>

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Última reforma 29 de enero de 2016 en el Diario Oficial de la Federación.

Controversia constitucional 29/2000. Facultades concurrentes en el sistema jurídico mexicano. Sus características generales. Poder Ejecutivo Federal. 15 de noviembre de 2001. Ponente: Sergio Salvador Aguirre Anguiano. Secretario: Pedro Alberto Nava Malagón. Consultado el 30 de marzo de 2016. En: <http://sjf.scjn.gob.mx/sjfsist/Documentos/Tesis/1001/1001011.pdf>

Cotler, H. (2004). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Instituto Nacional de Ecología.

Cristeche, E., y Penna, J. A. (2008). Métodos de valoración económica de los servicios ambientales. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales*, (3), 55.

DOF. (2005). Acuerdo por el que se determina como área natural protegida de competencia federal, con la categoría de Área de Protección de Recursos Naturales Zona Protectora Forestal los terrenos constitutivos de las cuencas de los ríos Valle de Bravo, Malacatepec, Tilostoc y Temascaltepec, Estado de México.

Doménech X. (1998). *Química de la hidrosfera. Origen y destino de los contaminantes*. Segunda edición. Miraguano ediciones.

---

Dunalska, J. A., y Wiśniewski, G. (2016). Can we stop the degradation of lakes? Innovative approaches in lake restoration. *Ecological Engineering*, 95, 714-722.

Ekholm, P., y Lehtoranta, J. (2012). Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication?. *Journal of environmental management*, 93(1), 140-146.

El Universal. (2012). *Mantienen compromiso de reabrir presa de Valle de Bravo*. Consultado el 20 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.eluniversaledomex.mx/otros/nota30391.html>

FAO. (s.f.). Nuestro futuro común: el informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Consultado el 20 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/s5780s/s5780s09.htm>

Fernández-Núñez, L. (2006). *¿Cómo analizar datos cualitativos?*. Boletín LA Recerca. Universidad de Barcelona.

Figuroa-Sanchez, M. A., Sarma, N., y Sarma, S. S. S. (2014). Zooplankton community structure in the presence of low levels of cyanotoxins: a case study in a high altitude tropical reservoir (Valle de Bravo, Mexico). *Journal of Limnology*, 73(1).

Franzén, F., Dinnétz, P., y Hammer, M. (2016). Factors affecting farmers' willingness to participate in eutrophication mitigation—A case study of preferences for wetland creation in Sweden. *Ecological Economics*, 130, 8-15.

Gaceta de Gobierno. (2003). Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de México. Programa de Ordenamiento ecológico regional de la Subcuenca de Valle de Bravo - Amanalco.

Galindo – Sosa J. A. y Jiménez – Alcázar A. (2015). Gobernanza del agua en México. Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS). Consultado el 30 de mayo de 2016. Disponible en: <http://aneas.com.mx/gobernanza-del-agua-en-mexico/>

Ghermandi A. y Fichtman E. (2015). Cultural ecosystem services of multifunctional constructed treatment wetlands and waste stabilization ponds: Time to enter the mainstream?. *Ecological Engineering*. (84). 615-623.

Ghermandi, A., Van Den Bergh, J. C., Brander, L. M., de Groot, H. L., & Nunes, P. A. (2010). Values of natural and human-made wetlands: A meta-analysis. *Water Resources Research*, 46(12).

---

Gobierno del Estado de México. (2015). *Producto Interno Bruto Municipal 2015*. Consultado el 03 de marzo de 2017. Disponible en: [http://igecem.edomex.gob.mx/sites/igecem.edomex.gob.mx/files/files/Archivos%20PDF/Productos%20Estadisticos/%C3%8Dndole%20Econ%C3%B3mica/PIB/PIB\\_municipal2015.pdf](http://igecem.edomex.gob.mx/sites/igecem.edomex.gob.mx/files/files/Archivos%20PDF/Productos%20Estadisticos/%C3%8Dndole%20Econ%C3%B3mica/PIB/PIB_municipal2015.pdf)

Graham, D. W., & Smith, V. H. (2004). Designed ecosystem services: application of ecological principles in wastewater treatment engineering. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(4), 199-206.

INEGI. (2017a). *Índice Nacional de Precios Productor*. Consultado el 27 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/IndicePrecios/Cuadro.aspx?nc=CA80&T=%C3%8Dndices%20de%20Precios%20al%20Productor&ST=%20INPP%20producci%C3%B3n%20total,%20por%20origen%20SCIAN%202007>

INEGI. (2017b). *Índice Nacional de Precios al Consumidor y sus Componentes*. Consultado el 27 de marzo de 2017. Disponible <http://www.inegi.org.mx/sistemas/IndicePrecios/Cuadro.aspx?nc=CA55&T=%C3%8Dndices%20de%20Precios%20al%20Consumidor&ST=%C3%8Dndice%20Nacional%20de%20Precios%20al%20Consumidor%20y%20sus%20componentes>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Fundación Gonzalo Río Arronte (2012). *Plan estratégico para la recuperación ambiental de la Cuenca Amanalco-Valle de Bravo: Actualización*. Consultado el 03 de marzo de 2017. Disponible en: [http://www.atl.org.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=5793:actualizacion-del-plan-estrategico-para-la-recuperacion-ambiental-de-la-cuenca-amanalco-valle-de-bravo&catid=171:proyectos-imta&Itemid=863](http://www.atl.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=5793:actualizacion-del-plan-estrategico-para-la-recuperacion-ambiental-de-la-cuenca-amanalco-valle-de-bravo&catid=171:proyectos-imta&Itemid=863)

Janus, L. L. and Vollenweider, R. A. (1981). The OECD Cooperative Programme on Eutrophication: Summary Report - Canadian Contribution. En *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. (Estudio FAO Riego y Drenaje-55). Consultado el 20 de febrero de 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s00.htm>

Jones, T. G., Willis, N., Gough, R., y Freeman, C. (2017). An experimental use of floating treatment wetlands (FTWs) to reduce phytoplankton growth in freshwaters. *Ecological Engineering*, 99, 316-323.

Kadlec R., Wallace S. (2009). *Treatment Wetlands*. Segunda edición. CRC Press. USA

---

Kadykalo, A. N., y Findlay, C. S. (2016). The flow regulation services of wetlands. *Ecosystem Services*, 20, 91-103.

Katko, T. S., y Hukka, J. J. 2015. Social and Economic Importance of Water Services in the Built Environment: Need for More Structured Thinking. *Procedia Economics and Finance*, 21, 217-223.

Kivaisi, A. K. (2001). The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review. *Ecological engineering*, 16(4), 545-560.

Knieper C., Holtz G., Kastens B. y Pahl – Wostl C. (2010). Analysing water governance in heterogeneous case studies - Experiences with a database approach. *Environmental Science and Policy*. (13), 592-603

La Jornada. (2012). *Reabren parcialmente la presa de Valle de Bravo*. Consultado el 18 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2012/07/13/estados/038n2est>

Leff, E. (2006). El agua como bien común o bien privado. *En Discursos sustentables* pp. 101-110. Siglo XXI editores, 2010, 2ª edición, México.

Ley de Aguas Nacionales, publicada el 1 de diciembre de 1992. Última reforma el 24 de marzo de 2016 en el Diario Oficial de la Federación.

Ley Federal de Derechos, publicada el 31 de diciembre de 1981. Última reforma del 23 de diciembre de 2016 en el Diario Oficial de la Federación.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, publicada el 28 de enero de 1988. Última reforma el 13 de mayo de 2016 en el Diario Oficial de la Federación.

Liu, R., Zhao, Y., Doherty, L., Hu, Y., y Hao, X. (2015). A review of incorporation of constructed wetland with other treatment processes. *Chemical Engineering Journal*, 279, 220-230.

Livermore, M., Glusman, A. y Moyano, G. (2013). Global Cost - Benefit Analysis. En Livermore, M. (Ed.). *The Globalization of Cost – Benefit Analysis in Environmental Policy*. Oxford University Press

López, N. S., Villarreal, L. Z., Contreras, T. R., y Salvatierra, N. M. (2016). Ordenamiento territorial, turismo y ambiente en Valle de Bravo, México. *Cuadernos*

---

*Geográficos*. Consultado el 17 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17121091009>

Luna-Pabello V. (2014). Humedal artificial. Una ecotecnia prehispánica para el manejo sustentable del agua. *APAUNAM*, año 6, No. 3. México, p. 176 y 179

Madrid, L. (2011). *Valoración de prácticas de manejo del territorio que proveen servicios ambientales hidrológicos*. Consejo civil Mexicano para la silvicultura sostenible. Consultado el 28 de mayo de 2016. Disponible en: [http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/esquema\\_psamarzo20113.pdf](http://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/esquema_psamarzo20113.pdf)

Mantilla-Morales, G., Jungdorf, S., Anthony, C., Sánchez Castañeda, L. F., Cedillo, M., Luis, J. y Hansen Rodríguez, I. R. (2004). Costos índice de sistemas de tratamiento de aguas residuales en México. In *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 29 (pp. 1-8). AIDIS.

Manzardo, A., Mazzi, A., Rettore, L., & Scipioni, A. (2014). Water use performance of water technologies: the Cumulative Water Demand and Water Payback Time indicators. *Journal of Cleaner Production*, 70, 251-258.

Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ediciones Omega, S.A. (pp. 831-871). Barcelona

MEA (2003). *Ecosystem and human well-being: a framework for assessment*. Island Press, *Washington, D.C.*

Metcalf y Eddy (2014). *Wastewater engineering: treatment and resource recovery*. Quinta edición. Revisado por G. Tchobanoglous, D. Stensel, R. Tsuchihashi y F. Burton. McGraw-Hill Education. Nueva York.

Mushtaq, S. (2013). Cost-Benefit Analysis of water management initiatives in China. A case of small, multipurpose reservoirs. En *The Globalization of Cost – Benefit Analysis in Environmental Policy*. Oxford University Press

OCAVM. (2015). *Estudio técnico multidisciplinario para la implementación de un sistema de humedales artificiales para saneamiento del aporte del Río Amanalco a la presa Valle de Bravo*.

Olvera Viascán, V. (1992). Estudio de eutroficación de la presa Valle de Bravo, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, (2-3): 148-161

---

ONU. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible. 17 objetivos para transformar nuestro mundo*. Consultado el 16 de abril de 2017. Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

ONU. (s.f.). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Consultado el 20 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>

Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2010). *Compendio del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII. Edición 2010*. Consultado el 20 de marzo de 2017. Disponible en: [http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/compendio\\_del\\_agua\\_.pdf](http://centro.paot.org.mx/documentos/conagua/compendio_del_agua_.pdf)

Ostrom, E. (2005). *Comprender la diversidad institucional*. Primera edición en español, 2015. Fondo de cultura económica.

Ostrom, E., Janssen, M. A. y Anderies, J. M. (2007). Going beyond panaceas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(39), 15176-15178.

Pahl-Wostl, C., Holtz, G., Kastens, B., y Knieper, C. (2010). Analyzing complex water governance regimes: the management and transition framework. *Environmental Science & Policy*, 13(7), 571-581.

Peñaloza, N. H., Villarreal, L. Z., y Martínez, E. E. V. (2011). Prácticas ambientales de las empresas turísticas en valle de Bravo. *Gestión y Ambiente*, 14(3), 65-78.

Pérez, G., Espinosa, A., Islas, P., Zarco, A. y Mazari-Hiriart M. (2016). Calidad del agua en la Cuenca Valle de Bravo-Amanalco, una propuesta para su manejo. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Consultado el 10 de marzo de 2017. Disponible en: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong\\_nal\\_06/tema\\_05/11\\_gustavo\\_perez.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/cong_nal_06/tema_05/11_gustavo_perez.pdf)

Procuenca. (2017). *Monitoreo de cuerpos de agua*. Consultado el 22 de marzo de 2017. Disponible en: <http://monitoreoagua.hol.es/Php/monitorear.php>

Procuenca. (s. f.). *¿Quiénes somos?*. Consultado el 19 de marzo de 2017. Disponible en: <http://procuenca.org/quienes-somos/>

Quintanilla-Terminel, J. G. (2012). *Estudio de las variaciones de elementos biolimitantes (nitrógeno y fósforo) en la fuente de agua superficial más importante*

---

que abastece al Valle de México (Valle de Bravo, Estado de México). Tesis de Licenciatura. México: Facultad de Química, UNAM.

Ramírez P., Martínez E., Martínez M. D. y Eslava C. (2004). Cianobacterias, microorganismos del fitoplancton y su relación con la salud humana. En Rosas I. y colaboradores, *Microbiología Ambiental* (pp. 84-106). México. INE-SEMARNAT. Consultado el 8 de febrero de 2017. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/440.pdf>

RAMSAR- CONANP. (s.f.). Humedales de México. Consultado el 31 de mayo de 2016. Disponible en: [http://ramsar.conanp.gob.mx/servicio\\_ambientales\\_y\\_amenazas.php#top](http://ramsar.conanp.gob.mx/servicio_ambientales_y_amenazas.php#top)

SAIMEX. (2017). Respuesta al oficio No. 80000/000580/2018

Sautu, Ruth; Boniolo, Paula; Dalle, Pablo; Elbert, Rodolfo. (2005). "La construcción del marco teórico en la investigación social". En: *Manual de metodología. Construcción del marco teórico, formulación de los objetivos y elección de la metodología*. CLACSO, Colección Campus Virtual, Buenos Aires, Argentina, pp. 47. Disponible en la Web: <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/ar/libros/campus/metodo/RSCapitulo1.pdf>

Scholz, C., Jones, T. G., West, M., Ehbair, A. M. S., Dunn, C., y Freeman, C. (2016). Constructed wetlands may lower inorganic nutrient inputs but enhance DOC loadings into a drinking water reservoir in North Wales. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(18), 18192-18199.

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)*, 6a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).

SECTUR. (2014). *Indicadores de competitividad y sustentabilidad de los pueblos mágicos. Estado de México, Valle de Bravo*. Consultado el 03 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.sectur.gob.mx/pueblos-magicos/valle-de-bravo-mexico/>

SEDESOL. (2010a). *Unidad de microrregiones. Cédulas de información municipal*. Consultado el 20 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=pdzp&ent=15&mun=007>

SEDESOL. (2010b). *Unidad de microrregiones. Cédulas de información municipal*. Consultado el 20 de marzo de 2017. Disponible en:

---

<http://www.microrregiones.gob.mx/zap/datGenerales.aspx?entra=nacion&ent=15&mun=110>

SEMARNAT. (2012). *NOM's en materia de agua*. Consultado el 14 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-agua>

Smith, V. H., Tilman, G. D., y Nekola, J. C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental pollution*, 100(1), 179-196.

Snell, M. (2011). *Cost-benefit analysis. A practical guide*. Segunda edición. Thomas Telford. Londres.

Subdirección general de agua potable, drenaje y saneamiento. (2014). *Diagnóstico del Programa U031. Operación y mantenimiento en plantas de tratamiento de aguas residuales*. CONAGUA. Consultado el 11 de noviembre de 2016. Disponible en: [http://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico\\_2014/Diagnostico\\_2014\\_SEMARNAT\\_U031.pdf](http://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_U031.pdf)

Trujillo - Segura, Julio. (2011). El principio de concurrencia ambiental en México. *Revista del Posgrado en Derecho*. Biblioteca Jurídica Virtual del Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM. Número 13.

Valle de Bravo ODAPAS. (s.f.). *Trámites y servicios*. Consultado el 22 de marzo de 2017. Disponible en: <http://www.opdapasvb.gob.mx/paginas/tramites.htm>

Van Cappellen, P., y Maavara, T. (2016). Rivers in the Anthropocene: global scale modifications of riverine nutrient fluxes by damming. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 16(2), 106-111.

Vargas Melgarejo L. M. (1994). Sobre el concepto de percepción. *Alteridades*, vol. 4, núm. 8, 1994, pp. 47-53. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Distrito Federal, México.

Vymazal, J. (2014). Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: a review. *Ecological Engineering*, 73, 724-751.

Whiteman, G., Forbes, B. C., Niemelä, J., y Chapin III, F. S. (2004). Bringing feedback and resilience of high-latitude ecosystems into the corporate boardroom. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(6), 371-376.

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., y Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594-601.

Yang, W., Chang, J., Xu, B., Peng, C., y Ge, Y. (2008). Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: A case study in Hangzhou, China. *Ecological Economics*, 68(1), 116-125.

Yang, Z., Wu, F., y Gao, X. (2016). Strategy for management of lake-catchment system integrated with natural and anthropogenic factors in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 96, 26-33.

Zhang, B., Shi, Y. T., Liu, J. H., y Xu, J. (2017). Economic values and dominant providers of key ecosystem services of wetlands in Beijing, China. *Ecological Indicators*, 77, 48-58.

## ANEXOS

### Anexo 1. Selección estudio caso utilizando el Análisis Jerárquico Multicriterio (Analysis Hierarchy Multicriterio , AHP)

Con la finalidad de decidir cuál es el estudio de caso que se utilizará para la investigación, se utilizará el Análisis Jerárquico Multicriterio (AHP, por sus siglas en inglés), como método para la toma de decisiones.

La toma de decisiones es el estudio de la identificación y selección de alternativas para encontrar la mejor solución a un determinado problema con base en diferentes factores y atributos (San Cristóbal, 2012).

La técnica AHP se basa en la evaluación de un conjunto de alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión, a través de comparaciones pareadas, con base en los juicios de expertos para derivar escalas de prioridad y determinar cuánto más un factor domina sobre otro para determinado atributo (Saaty, 2008).

El procedimiento a seguir es: establecer la meta, seleccionar los criterios y definir los subcriterios, ponderándolos.

**Meta:** Seleccionar el estudio de caso que permita lograr los alcances del proyecto.

**Alternativas:** En la Tabla 39 se enlistan los posibles casos de estudio

**Tabla 39.- Alternativas de los casos de estudio**

| ID | Alternativas  |
|----|---|
| A1 | Humedal Artificial en el Bosque de San Juan de Aragón (construido)                        |
| A2 | Humedal artificial en Xochimilco (no construido)  |
| A3 | Humedales artificiales en el municipio de Amanalco en el Estado de México (no construido) |

**Criterios:** En la Tabla 40, se muestran los criterios que se utilizarán para elegir el caso de estudio y su descripción.

**Tabla 40.- Criterios para seleccionar el caso de estudio y su descripción**

|   | <b>Criterio</b>   | <b>Descripción</b>  |
|---|---|---|
| 1 | Compatibilidad en el cumplimiento de los objetivos en el ámbito social del proyecto (O) | Existencia de condiciones sociales en el sitio favorecen el cumplimiento de los objetivos del proyecto.   |
| 2 | El área de estudio permite realizar alguna aportación nueva y de valor (N).             | Las condiciones del área de estudio dan la posibilidad de proponer algo nuevo y de valor en el ámbito de humedales artificiales.  |
| 3 | Accesibilidad a la información (A)  | Existe la disposición de instancias gubernamentales, asociaciones civiles o actores clave del sitio de estudio que permitan accesibilidad a la información así como facilidad para que se realice trabajo de campo en el área de estudio. |

Para realizar la transformación cualitativa a valores cuantitativos, se utilizan los parámetros que se muestran en la Tabla 41, de forma pareada, de la cual resulta una matriz de comparación pareada entre los criterios, que establece la jerarquización de los mismos.

**Tabla 41.- Transformación cualitativa a valores cuantitativos**

| <b>Importancia</b>    | <b>Valor Cardinal</b> |
|-----------------------|-----------------------|
| Igual                 | 1                     |
| Moderada              | 3                     |
| Fuerte                | 5                     |
| Muy Fuerte            | 7                     |
| Extremadamente fuerte | 9                     |

En la Tabla 42, se muestra la matriz de comparaciones pareadas de los criterios utilizados.

**Tabla 42.- Matriz de comparaciones pareadas de los criterios de evaluación**

|             | <b>O</b> | <b>N</b> | <b>A</b> |
|-------------|----------|----------|----------|
| <b>O</b>    | 1        | 1/2      | 1/6      |
| <b>N</b>    | 2        | 1        | 1/4      |
| <b>A</b>    | 6        | 4        | 1        |
| <b>Suma</b> | 9,00     | 5,50     | 1,42     |

Posteriormente se procede a normalizar los criterios para obtener el peso de cada criterio, de este proceso resulta lo siguiente (Tabla 43):

**Tabla 43.- Comparaciones normalizadas y peso ponderado de cada criterio**

|   | O    | N    | A    | Peso |
|---|------|------|------|------|
| O | 0,11 | 0,09 | 0,12 | 0,11 |
| N | 0,22 | 0,18 | 0,18 | 0,19 |
| A | 0,67 | 0,73 | 0,71 | 0,70 |

Por lo que en la compatibilidad con los objetivos del proyecto tiene un peso del 11%, aportes de novedad y valor el 19% y la accesibilidad a la información en el sitio de estudio 19%, para elegir el caso de estudio.

El índice de inconsistencia es del 0.5% (este valor indica la validez de las comparaciones pareadas, en general menos del 10% se considera muy aceptable).

Una vez establecidos los pesos de los criterios, se procede a asignar el valor de las categorías de evaluación de cada criterio.

### **Criterio 1: Compatibilidad en el cumplimiento de los objetivos en el ámbito social del proyecto (O)**

**Tabla 44.- Subcriterios de evaluación del criterio 1**

| Descripción   | Valor cardinal |
|---|----------------|
| La alternativa presenta características sociales y actores clave de la misma naturaleza.  | 1              |
| La alternativa presenta características sociales homogéneas y dos o más actores clave de distintos ámbitos institucionales.   | 2              |
| La alternativa presenta diversos actores clave así como heterogeneidad en las condiciones sociales, que permitan generar una propuesta de valor para la implementación de humedales artificiales. | 3              |

### **Criterio 2: El área de estudio permite realizar alguna aportación nueva y de valor (N).**

**Tabla 45.- Subcriterios de evaluación del criterio 2**

| Descripción  | Valor cardinal |
|--|----------------|
| El área de estudio no tiene características que la diferencien de otros trabajos ya propuestos en el ámbito de los humedales artificiales. | 1              |
| El área de estudio tiene una o dos características que permiten realizar un aporte nuevo en el ámbito de los humedales artificiales        | 2              |

| Descripción  | Valor cardinal |
|--|----------------|
| El área de estudio tiene más de dos características que permiten realizar un aporte nuevo en el ámbito de los humedales artificiales | 3              |

### Criterio 3: Accesibilidad a la información (A).

**Tabla 46.- Subcriterios de evaluación del criterio 3**

| Descripción   | Valor cardinal |
|---|----------------|
| No existe disposición para acceder a la información ni ningún tipo de contacto en el área de estudio.                                     | 1              |
| Existe contacto con algún actor clave en el área de estudio, pero la comunicación no es buena y el acceso a la información es limitado.   | 2              |
| Existe disposición para acceder a la información, así como algún contacto o actor clave en el área de estudio y la comunicación es buena. | 3              |

El resultado de la evaluación se obtiene al multiplicar el peso de cada criterio por el valor que cada alternativa obtuvo (Tabla 47).

**Tabla 47.- Resultados de la evaluación AHP**

| Criterio     | O<br>(0,11) | N<br>(0,19) | A<br>(0,70) | Resultado |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Alternativas |             |             |             |           |
| A1           | 2           | 2           | 1           | 1,3       |
| A2           | 2           | 1           | 3           | 2,5       |
| A3           | 2           | 3           | 3           | 2,9       |

### Conclusión:

Del ejercicio de evaluación realizado utilizando el método AHP, se observa que la alternativa de caso de estudio más viable es la A3, es decir, los Humedales Artificiales tentativamente a construirse en el municipio de Amanalco en el Estado de México.

## Anexo 2. Parámetros de cumplimiento en la descarga de agua a cuerpos nacionales

Según la Ley Federal de Derechos (LFD), el río Amanalco es un cuerpo receptor tipo B, mientras que la Presa es un cuerpo receptor tipo C. En la Tabla 48, se muestran los valores de los límites máximos permisibles de los parámetros que indican la calidad del agua.

**Tabla 48.- Límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996**

| Parámetro             | Unidades   | Ríos (B): Uso público urbano |          | Embalses (C): Uso público urbano |          |
|-----------------------|------------|------------------------------|----------|----------------------------------|----------|
|                       |            | PM*                          | PD**     | PM*                              | PD**     |
| Temperatura           | °C         | 40                           | 40       | 40                               | 40       |
| Grasas y aceites      | mg/L       | 15                           | 25       | 15                               | 25       |
| Coliformes Fecales    | NMP/100 mL | 1,000                        | 1,000    | 1,000                            | 1,000    |
| Huevos de Helminto    | huevo/L    | ≤ 1                          | ≤ 1      | ≤ 5                              | ≤ 5      |
| SST                   | mg/L       | 75                           | 125      | 40                               | 60       |
| DBO <sub>5</sub>      | mg/L       | 75                           | 150      | 30                               | 60       |
| Materia Flotante      | N/A        | Ausente                      | Ausente  | Ausente                          | Ausente  |
| Sólidos Sedimentables | mL/L       | 1                            | 1        | 1                                | 1        |
| Nitrógeno Total       | mg/L       | 40                           | 60       | 15                               | 25       |
| Fósforo Total         | mg/L       | 20                           | 30       | 5                                | 10       |
| Arsénico              | mg/L       | 0.1                          | 0.2      | 0.1                              | 0.2      |
| Cadmio                | mg/L       | 0.1                          | 0.2      | 0.1                              | 0.2      |
| Cianuros              | mg/L       | 1                            | 2        | 1                                | 2        |
| Cobre                 | mg/L       | 4                            | 6        | 4                                | 6        |
| Cromo 6+              | mg/L       | 0.5                          | 1        | 0.5                              | 1        |
| Mercurio              | mg/L       | 0.005                        | 0.01     | 0.005                            | 0.01     |
| Níquel                | mg/L       | 2                            | 4        | 2                                | 4        |
| Plomo                 | mg/L       | 0.2                          | 0.4      | 0.2                              | 0.4      |
| Zinc                  | mg/L       | 10                           | 20       | 10                               | 20       |
| pH                    | Unidades   | 5.5 - 10                     | 5.5 - 10 | 5.5 - 10                         | 5.5 - 10 |

Fuente: Ley Federal de Derechos, 2016

\*Promedio mensual

\*\*Promedio diario

Además de los parámetros anteriores, en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (1) (S.E.D.U.E., 1989), se especifica en su fracción XXV, que:

*Los fosfatos totales, medidos como fósforo, no deberán exceder de 0.05 mg/L en influentes a lagos o embalses ni de 0.025 mg/L dentro del lago o embalse, para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutroficación acelerada. Para el caso de ríos y arroyos, se permitirán concentraciones de hasta 0.1 mg/L.*

Sin embargo, no se especifica la unidad de tiempo en la que se permite la concentración.

### Anexo 3. Entrevista semi-estructurada

| Información socioeconómica                            |                       |
|---|-----------------------|
| <b>Nombre:</b>  | <b>No entrevista:</b> |
| <b>Género</b> Femenino                      Masculino | <b>Edad (años):</b>   |
| <b>Ocupación:</b>                                     | <b>Organización:</b>  |
| <b>Clave:</b>   |                       |

| Organización social   |
|---|
| 1. ¿Cómo está organizada la localidad (organigrama, toma de decisiones, participación y rendición de cuentas)? PM, LM   |
| 2. ¿Hay algún comité que se encargue del manejo del agua? ¿Cómo se relaciona con la PTAR? PM, LM  |
| 3. ¿Se realizan asambleas municipales? ¿quiénes asisten?, ¿qué temas se tratan, se trata el tema del agua? (aspectos) PM, JF (M-H) EJ                                 |
| 4. ¿Se trata el tema del agua en las asambleas ejidales?, ¿Cuáles temas?, ¿Qué peso tiene? EJ   |
| 5. ¿Qué tan organizada piensa que es la comunidad? ¿para qué se organizan (fiestas patronales, programas de gobierno para resolver problemas comunes? JF (M-H) EJ, LM |
| 6. ¿Existen acuerdos en torno al uso del agua, y en torno al mantenimiento del río (explorar)? JF (M-H) EJ, LM  |

|   |
|---|
| 7. ¿Cómo es la relación con la PTAR la CAEM y CONAGUA? en general, ¿en cuanto a toma de decisiones, hay cooperación/conflicto o ausencia de interacción?  |
| <b>Percepción del agua</b>  |
| 8. ¿Usted utiliza el agua río? Sí No ¿qué usos le da? JF (H;M) EJ   |
| 9. ¿Piensa que hay más o menos agua que hace 20 años? ¿Cree que el agua está más o menos contaminada? ¿por qué? JF (H, M); EJ   |
| 10. ¿Qué sucedería si disminuyera el acceso al agua del río? JF (H;M) EJ  |
| 11. Para usted el río tiene problemas de: JF (H;M) EJ, ES, CL <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1.- Falta de agua,</li> <li>2.- Inundaciones,</li> <li>3.- Contaminación</li> <li>4- Otros</li> </ul> ¿Se percibe el problema de eutroficación? ¿Cómo lo perciben los distintos actores, a que causas se atribuyen, que alternativas de solución plantean? |
| 12. ¿Qué tan fuertes son estos problemas? 1, 2, 3 JF (H;M) EJ, ES, CL   |
| <b>• Todas a JF (H; M) EJ:</b>  |
| 13. ¿Cuáles son las causas de estos problemas 1, 2, 3? (agricultura, otros)   |
| 14. ¿Qué piensa que se puede hacer para solucionar estos problemas? 1, 2, 3   |
| 15. ¿Quiénes debieran ser los responsables de hacerlo y quiénes debieran participar en implementar esas soluciones? 1, 2, 3   |
| 16. ¿Qué actividades o acciones está permitidas en el río?  |

|   |
|---|
| 17. ¿Qué actividades están prohibidas en torno al uso del río?  |
| 18. ¿Qué actividades son obligatorias en torno al agua del río?   |
| 19. ¿Conoce la Planta de Tratamiento de Aguas residuales? Sí No   |
| 20. ¿Cómo piensa que funciona?  |
| 21. ¿Cree que tratar el agua es importante? Sí No<br>¿Por qué?  |
| 22. ¿Conoce qué son los humedales artificiales? (Explicación HA, uso de fotografías)                                    |
| 23. Si pudiera obtener algún beneficio por apoyar en el mantenimiento de los humedales artificiales, ¿cuál sería?       |
| <b>Percepción del tratamiento de agua (FCON, FCAM)</b>  |
| 24. ¿Cuenta con conexión al colector municipal?   |
| 25. Si no cuenta con conexión al colector municipal, ¿hacia dónde va el agua de desechos de sus actividades cotidianas? |
| <b>PTAR (OP)</b>  |
| 26. ¿Cómo es el funcionamiento de la PTAR?  |
| 27. ¿Opera todo el año?   |
| 28. ¿Cuál es su trabajo en la PTAR?   |
| <b>Percepción del agua (FCON, FCAM)</b>   |

---

|  |
|--|
| 29. ¿Es importante realizar el tratamiento del agua en el país, en el Estado en Amanalco? ¿Por qué?  |
| 30. ¿Cuáles son las mayores dificultades con las que se enfrentan para la administración y tratamiento de los recursos hídricos?   |
| 31. ¿Cómo efectúan el tratamiento del agua? ¿Quiénes son los responsables? ¿Quiénes participan? ¿Por qué han optado por esas opciones?   |
| 32. ¿Cómo es la organización entre los tres órdenes de gobierno para efectuar el tratamiento de agua?  |
| 33. A largo plazo, ¿cuál piensa que será la estrategia para efectuar el tratamiento del agua en el país, en el estado y en el municipio?   |
| 34. ¿Cuál es su opinión respecto a involucrar a las personas de las comunidades a participar en el tratamiento y conservación del agua? ¿En qué aspectos deben participar? (profundizar) |

## Anexo 4. Resultados extendidos ACB

Tabla 49.- Resultados ACB del escenario 1 (valores máximos)

| Escenario 1                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA                               | 22.334.528  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA                     |             | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |
| Mantenimiento PLA                 |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 22.334.528  | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -22.334.528 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -22.334.528 | 4.804.915 | 4.511.657 | 4.236.298 | 3.977.744 | 3.443.019 | 3.507.015 | 3.292.972 | 3.091.993 | 2.903.279 | 2.512.994 |

| Escenario 1                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |  |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| PLA                               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Operación PLA                     | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |  |
| Mantenimiento PLA                 |           |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |  |
| <b>Total de costos</b>            | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |  |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Recreación                        | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 | 2.105.745 |  |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Beneficios netos (B-C)            | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 |  |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |  |
| Beneficios netos descontados      | 2.559.703 | 2.403.477 | 2.256.786 | 2.119.048 | 1.834.186 | 1.868.278 | 1.754.252 | 1.647.185 | 1.546.653 | 1.452.256 |  |

Tabla 50.- Resultados ACB del escenario 2 (valores máximos)

| Escenario 2                       |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 0           | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
| <b>Costos</b>                     |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| PLA-HA                            | 55.750.416  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación PLA-HA                  |             | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |
| Mantenimiento PLA-HA              |             |            |            |            |            | 400.000    |            |            |            |            | 400.000    |
| <b>Total de costos</b>            | 55.750.416  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  |
| <b>Beneficios</b>                 |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        |             | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |
| Servicios ambientales HA          |             | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.750.416 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.504.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.504.801 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94       | 0,88       | 0,83       | 0,78       | 0,73       | 0,69       | 0,64       | 0,60       | 0,57       | 0,53       |
| Beneficios netos descontados      | -55.750.416 | 40.286.198 | 37.827.416 | 35.518.700 | 33.350.892 | 31.023.440 | 29.404.124 | 27.609.506 | 25.924.419 | 24.342.177 | 22.643.414 |

| Escenario 2                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|--|
| Año                               | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |  |
| <b>Costos</b>                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| <b>1. Inversión</b>               |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| PLA-HA                            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| <b>2. Operacionales</b>           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| Operación PLA-HA                  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |  |
| Mantenimiento PLA-HA              |            |            |            |            | 400.000    |            |            |            |            |            |  |
| <b>Total de costos</b>            | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |  |
| <b>Beneficios</b>                 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| Recreación                        | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |  |
| Servicios ambientales HA          | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  |  |
| <b>Total de beneficios</b>        | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 | 44.320.801 |  |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |  |
| Beneficios netos (B-C)            | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.504.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 | 42.904.801 |  |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50       | 0,47       | 0,44       | 0,41       | 0,39       | 0,37       | 0,34       | 0,32       | 0,30       | 0,28       |  |
| Beneficios netos descontados      | 21.461.507 | 20.151.649 | 18.921.736 | 17.766.889 | 16.526.994 | 15.664.342 | 14.708.303 | 13.810.613 | 12.967.712 | 12.176.255 |  |

Tabla 51.- Resultados ACB del escenario 3 (valores máximos)

| Escenario 3                       |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 0           | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
| <b>Costos</b>                     |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| HA                                | 55.320.397  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación HA                      |             | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| Mantenimiento HA                  |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Total de costos</b>            | 55.320.397  | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| <b>Beneficios</b>                 |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        |             | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| Servicios ambientales HA          |             | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.320.397 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94       | 0,88       | 0,83       | 0,78       | 0,73       | 0,69       | 0,64       | 0,60       | 0,57       | 0,53       |
| Beneficios netos descontados      | -55.320.397 | 31.526.833 | 29.602.660 | 27.795.925 | 26.099.460 | 24.506.535 | 23.010.831 | 21.606.414 | 20.287.713 | 19.049.496 | 17.886.850 |

| Escenario 3                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |
| <b>Costos</b>                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| HA                                |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación HA                      | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| Mantenimiento HA                  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Total de costos</b>            | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| <b>Beneficios</b>                 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| Servicios ambientales HA          | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  | 2.205.905  |
| <b>Total de beneficios</b>        | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 | 33.792.077 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 | 33.576.077 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50       | 0,47       | 0,44       | 0,41       | 0,39       | 0,37       | 0,34       | 0,32       | 0,30       | 0,28       |
| Beneficios netos descontados      | 16.795.165 | 15.770.108 | 14.807.613 | 13.903.862 | 13.055.269 | 12.258.469 | 11.510.299 | 10.807.793 | 10.148.162 | 9.528.791  |

Tabla 52.- Resultados ACB del escenario 1 (valores mínimos)

| Escenario 1                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA                               | 22.334.528  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA                     |             | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |
| Mantenimiento PLA                 |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 22.334.528  | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 |
|                                   |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 |
|                                   |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -22.334.528 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.174.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.174.362 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,89      | 0,84      | 0,79      | 0,75      | 0,70      | 0,67      | 0,63      | 0,59      | 0,56      |
| Beneficios netos descontados      | -22.334.528 | 4.315.436 | 4.071.166 | 3.840.722 | 3.623.323 | 3.119.326 | 3.224.745 | 3.042.212 | 2.870.011 | 2.707.558 | 2.330.942 |

| Escenario 1                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |  |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| PLA                               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Operación PTAR                    | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |  |
| Mantenimiento PTAR                |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |           |  |
| <b>Total de costos</b>            | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |  |
|                                   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Recreación                        | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 |  |
|                                   |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Beneficios netos (B-C)            | 1.064.787 | 1.064.787 | 1.064.787 | 1.064.787 | 664.787   | 1.064.787 | 1.064.787 | 1.064.787 | 1.064.787 | 1.064.787 |  |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,53      | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,42      | 0,39      | 0,37      | 0,35      | 0,33      | 0,31      |  |
| Beneficios netos descontados      | 560.917   | 529.167   | 499.214   | 470.956   | 277.393   | 419.150   | 395.424   | 373.042   | 351.926   | 332.006   |  |

Tabla 53.- Resultados ACB del escenario 2 (valores mínimos)

| Escenario 2                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA-HA                            | 55.750.416  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA-HA                  |             | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| Mantenimiento PLA-HA              |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 55.750.416  | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| Servicios ambientales HA          |             | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.750.416 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.409.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.409.480 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -55.750.416 | 4.515.944 | 4.240.323 | 3.981.524 | 3.738.520 | 3.218.395 | 3.296.101 | 3.094.930 | 2.906.038 | 2.728.674 | 2.349.045 |

| Escenario 2                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA-HA                            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA-HA                  | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| Mantenimiento PLA-HA              |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| Servicios ambientales HA          | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 |
| <b>Total de beneficios</b>        | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 | 5.715.480 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.409.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 | 4.809.480 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |
| Beneficios netos descontados      | 2.405.761 | 2.258.930 | 2.121.061 | 1.991.607 | 1.714.523 | 1.755.919 | 1.648.750 | 1.548.122 | 1.453.636 | 1.364.916 |

Tabla 54.- Resultados ACB del escenario 3 (valores mínimos)

| Escenario 3                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| HA                                | 55.320.397  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación HA                      |             | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| Mantenimiento HA                  |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 55.320.397  | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| Servicios ambientales HA          |             | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.320.397 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -55.320.397 | 4.834.293 | 4.539.243 | 4.262.200 | 4.002.065 | 3.757.808 | 3.528.458 | 3.313.106 | 3.110.898 | 2.921.031 | 2.742.752 |

| Escenario 3                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| HA                                |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación HA                      | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| Mantenimiento HA                  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| Servicios ambientales HA          | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 | 2.205.905 |
| <b>Total de beneficios</b>        | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 | 5.364.522 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 | 5.148.522 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |
| Beneficios netos descontados      | 2.575.354 | 2.418.173 | 2.270.585 | 2.132.004 | 2.001.882 | 1.879.701 | 1.764.978 | 1.657.256 | 1.556.109 | 1.461.135 |

Tabla 55.- Resultados ACB del escenario 1 (valores máximos sin servicios ambientales)

| Escenario 1                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA                               | 22.334.528  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA                     |             | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |
| Mantenimiento PLA                 |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 22.334.528  | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -22.334.528 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -22.334.528 | 4.804.915 | 4.511.657 | 4.236.298 | 3.977.744 | 3.443.019 | 3.507.015 | 3.292.972 | 3.091.993 | 2.903.279 | 2.512.994 |

| Escenario 1                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |  |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| PLA                               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Operación PLA                     | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |  |
| Mantenimiento PLA                 |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |           |  |
| <b>Total de costos</b>            | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.600.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 | 1.200.000 |  |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Recreación                        | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 | 6.317.234 |  |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |
| Beneficios netos (B-C)            | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 4.717.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 | 5.117.234 |  |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |  |
| Beneficios netos descontados      | 2.559.703 | 2.403.477 | 2.256.786 | 2.119.048 | 1.834.186 | 1.868.278 | 1.754.252 | 1.647.185 | 1.546.653 | 1.452.256 |  |

Tabla 56.- Resultados ACB del escenario 2 (valores máximos sin servicios ambientales)

| Escenario 2                       |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 0           | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
| <b>Costos</b>                     |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| PLA-HA                            | 55.750.416  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación PLA-HA                  |             | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |
| Mantenimiento PLA-HA              |             |            |            |            |            | 400.000    |            |            |            |            | 400.000    |
| <b>Total de costos</b>            | 55.750.416  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  |
| <b>Beneficios</b>                 |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        |             | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |
| Servicios ambientales HA          |             | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.750.416 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.298.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.298.896 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94       | 0,88       | 0,83       | 0,78       | 0,73       | 0,69       | 0,64       | 0,60       | 0,57       | 0,53       |
| Beneficios netos descontados      | -55.750.416 | 38.214.925 | 35.882.559 | 33.692.544 | 31.636.191 | 29.413.392 | 27.892.342 | 26.189.992 | 24.591.542 | 23.090.650 | 21.468.271 |

| Escenario 2                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |
| <b>Costos</b>                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| PLA-HA                            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación PLA-HA                  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |
| Mantenimiento PLA-HA              |            |            |            |            | 400.000    |            |            |            |            |            |
| <b>Total de costos</b>            | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.816.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  | 1.416.000  |
| <b>Beneficios</b>                 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |
| Servicios ambientales HA          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>Total de beneficios</b>        | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 | 42.114.896 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.298.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 | 40.698.896 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50       | 0,47       | 0,44       | 0,41       | 0,39       | 0,37       | 0,34       | 0,32       | 0,30       | 0,28       |
| Beneficios netos descontados      | 20.358.086 | 19.115.573 | 17.948.895 | 16.853.423 | 15.669.280 | 14.858.977 | 13.952.091 | 13.100.555 | 12.300.990 | 11.550.226 |

Tabla 57.- Resultados ACB del escenario 3 (valores máximos sin servicios ambientales)

| Escenario 3                       |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 0           | 1          | 2          | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          | 9          | 10         |
| <b>Costos</b>                     |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| HA                                | 55.320.397  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación HA                      |             | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| Mantenimiento HA                  |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Total de costos</b>            | 55.320.397  | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| <b>Beneficios</b>                 |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        |             | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| Servicios ambientales HA          |             | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.320.397 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94       | 0,88       | 0,83       | 0,78       | 0,73       | 0,69       | 0,64       | 0,60       | 0,57       | 0,53       |
| Beneficios netos descontados      | -55.320.397 | 29.455.560 | 27.657.803 | 25.969.768 | 24.384.759 | 22.896.487 | 21.499.049 | 20.186.900 | 18.954.836 | 17.797.968 | 16.711.707 |

| Escenario 3                       |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Año                               | 11         | 12         | 13         | 14         | 15         | 16         | 17         | 18         | 19         | 20         |
| <b>Costos</b>                     |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>1. Inversión</b>               |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| HA                                |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>2. Operacionales</b>           |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Operación HA                      | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| Mantenimiento HA                  |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| <b>Total de costos</b>            | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    | 216.000    |
| <b>Beneficios</b>                 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Recreación                        | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| Servicios ambientales HA          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          | 0          |
| <b>Total de beneficios</b>        | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 | 31.586.172 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| Beneficios netos (B-C)            | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 | 31.370.172 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50       | 0,47       | 0,44       | 0,41       | 0,39       | 0,37       | 0,34       | 0,32       | 0,30       | 0,28       |
| Beneficios netos descontados      | 15.691.744 | 14.734.032 | 13.834.772 | 12.990.396 | 12.197.555 | 11.453.103 | 10.754.087 | 10.097.735 | 9.481.441  | 8.902.762  |

Tabla 58.- Resultados ACB del escenario 1 (valores mínimos sin servicios ambientales)

| Escenario 1                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA                               | 22.334.528  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA                     |             | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |
| Mantenimiento PLA                 |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 22.334.528  | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 | 5.264.362 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -22.334.528 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.174.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.174.362 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,89      | 0,84      | 0,79      | 0,75      | 0,70      | 0,67      | 0,63      | 0,59      | 0,56      |
| Beneficios netos descontados      | -22.334.528 | 4.315.436 | 4.071.166 | 3.840.722 | 3.623.323 | 3.119.326 | 3.224.745 | 3.042.212 | 2.870.011 | 2.707.558 | 2.330.942 |

| Escenario 1                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA                               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA                     | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |
| Mantenimiento PLA                 |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 1.090.000 | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   | 690.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 | 1.754.787 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.174.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 | 4.574.362 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,53      | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,42      | 0,39      | 0,37      | 0,35      | 0,33      | 0,31      |
| Beneficios netos descontados      | 2.409.717 | 2.273.318 | 2.144.639 | 2.023.245 | 1.741.815 | 1.800.681 | 1.698.755 | 1.602.599 | 1.511.886 | 1.426.308 |

Tabla 59.- Resultados ACB del escenario 2 (valores mínimos sin servicios ambientales)

| Escenario 2                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA-HA                            | 55.750.416  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA-HA                  |             | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| Mantenimiento PLA-HA              |             |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           | 400.000   |
| <b>Total de costos</b>            | 55.750.416  | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| Servicios ambientales HA          |             | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.750.416 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.203.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.203.575 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -55.750.416 | 2.444.671 | 2.295.466 | 2.155.367 | 2.023.819 | 1.608.347 | 1.784.319 | 1.675.416 | 1.573.161 | 1.477.146 | 1.173.902 |

| Escenario 2                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PLA-HA                            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PLA-HA                  | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| Mantenimiento PLA-HA              |           |           |           |           | 400.000   |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 1.306.000 | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   | 906.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| Servicios ambientales HA          | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| <b>Total de beneficios</b>        | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 | 3.509.575 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.203.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 | 2.603.575 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |
| Beneficios netos descontados      | 1.302.340 | 1.222.854 | 1.148.220 | 1.078.141 | 856.808   | 950.553   | 892.538   | 838.064   | 786.914   | 738.887   |

Tabla 60.- Resultados ACB del escenario 3 (valores mínimos sin servicios ambientales)

| Escenario 3                       |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 0           | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         | 9         | 10        |
| <b>Costos</b>                     |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| HA                                | 55.320.397  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación HA                      |             | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| Mantenimiento HA                  |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 55.320.397  | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        |             | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| Servicios ambientales HA          |             | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| <b>Total de beneficios</b>        |             | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | -55.320.397 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 1,00        | 0,94      | 0,88      | 0,83      | 0,78      | 0,73      | 0,69      | 0,64      | 0,60      | 0,57      | 0,53      |
| Beneficios netos descontados      | -55.320.397 | 2.763.021 | 2.594.386 | 2.436.043 | 2.287.364 | 2.147.760 | 2.016.676 | 1.893.592 | 1.778.021 | 1.669.503 | 1.567.609 |

| Escenario 3                       |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Año                               | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        | 19        | 20        |
| <b>Costos</b>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>1. Inversión</b>               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| PTAR-HA                           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>2. Operacionales</b>           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Operación PTAR-HA                 | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| Mantenimiento PTAR-HA             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| <b>Total de costos</b>            | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   | 216.000   |
| <b>Beneficios</b>                 |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Recreación                        | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| Servicios ambientales HA          | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |
| <b>Total de beneficios</b>        | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 | 3.158.617 |
| <b>Flujos financieros anuales</b> |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Beneficios netos (B-C)            | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 | 2.942.617 |
| <b>Factor de descuento</b>        | 0,50      | 0,47      | 0,44      | 0,41      | 0,39      | 0,37      | 0,34      | 0,32      | 0,30      | 0,28      |
| Beneficios netos descontados      | 1.471.933 | 1.382.097 | 1.297.744 | 1.218.539 | 1.144.168 | 1.074.336 | 1.008.766 | 947.198   | 889.388   | 835.106   |