



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

## **CAMPUS PUEBLA**

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

### **EFFECTOS DEL AGUA TRATADA, EN SUELO Y CULTIVOS AGRÍCOLAS: CASO DE LA PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE ATLIXCO, PUEBLA**

**IVET OLVERA BAUTISTA**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS**

PUEBLA, PUEBLA

2017



# COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS  
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

SUBDIRECCIÓN DE EDUCACIÓN  
CAMPUS PUEBLA

CAMPUE- 43-2-03

## CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe **Ivet Olvera Bautista**, alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Ignacio Ocampo Fletes**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **EFFECTOS DEL AGUA TRATADA, EN SUELO Y CULTIVOS AGRÍCOLAS: CASO DE LA PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE ATLIXCO, PUEBLA**, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla, a 5 de diciembre del 2016.

Ivet Olvera Bautista

Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis  
Dr. Ignacio Ocampo Fletes

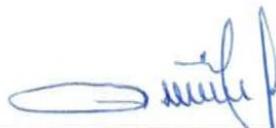
La presente tesis, titulada: **EFFECTOS DEL AGUA TRATADA, EN SUELO Y CULTIVOS AGRÍCOLAS: CASO DE LA PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE ATLIXCO, PUEBLA**, realizada por la alumna: **Ivet Olvera Bautista**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. IGNACIO OCAMPO FLETES

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO TORNERO CAMPANTE

ASESORA:



DRA. SONIA EMILIA SILVA GÓMEZ

ASESOR:



DR. EDUARDO GONZÁLEZ FLORES

Puebla, Puebla, México, 2016

EFFECTOS DEL AGUA TRATADA, EN SUELO Y CULTIVOS AGRÍCOLAS: CASO  
DE LA PLANTA TRATADORA DE AGUAS RESIDUALES DEL MUNICIPIO DE  
ATLIXCO, PUEBLA

Ivet Olvera Bautista, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2016

En México la generación de agua residual municipal rebasa  $7.458 \cdot 10^9$  metros cúbicos por año. Esta agua se utiliza de diversas formas: la más importante es para riego agrícola, ya que en el país alrededor de 35,000 ha son irrigadas con este tipo de aguas. Esta práctica tiene diferentes riesgos para el suelo, los cultivos y la salud humana y animal. En el caso del municipio de Atlixco, Puebla, se genera agua residual municipal que se vierte al cuerpo de agua Cantarranas, que irriga la zona agrícola de Santa Ana Coatepec del municipio de Huaquechula. Para disminuir el problema de contaminación, el Ayuntamiento de Atlixco, a través del SOAPAMA y la CONAGUA, instalaron una planta tratadora de aguas residuales. Desde su puesta en marcha no se han realizado estudios que muestren los efectos de las aguas tratadas en los recursos naturales de uso agrícola y la población, por lo que se planteó como objetivo medir la calidad del agua y el efecto en suelo y cultivos agrícolas así como la percepción de los productores sobre los efectos en suelo, cultivos agrícolas y en su salud. Se realizaron dos muestreos compuestos y análisis de agua con base en la NOM-001-SEMARNAT-1996, observando que la calidad del efluente cumple con la normatividad oficial. La calidad agronómica de los puntos muestreados deja en evidencia que su uso debe ser restringido. El muestreo al suelo con base en la NOM-021-RECNAT-2000 resultó que el punto inmediato de riego presenta problemas de salinidad. Los muestreos en calabacita, huazontle y té limón resultaron con presencia de trazas de metales pesados. Se encontró plomo en cantidades tolerables y níquel en porcentajes tóxicos. Los productores perciben que el agua está contaminada; afecta positivamente al suelo y a la planta, aunque esta es más susceptible a plagas. En su salud perciben irritación en la piel.

Palabras clave: Calidad de cultivos, calidad del agua tratada, calidad del suelo, percepción campesina, PTAR.

EFFECTS OF WATER TREATED, IN SOIL AND AGRICULTURAL CROPS: CASE  
OF THE RESIDUAL WASTEWATER TREATMENT PLANT OF THE MUNICIPALITY  
OF ATLIXCO, PUEBLA

Ivet Olvera Bautista, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2016

In Mexico, municipal wastewater generation exceeds  $7.458 \times 10^9$  cubic meters per year. This water is used in various forms: the most important is for agricultural irrigation, since in the country about 35,000 ha are irrigated with this type of water. This practice has different risks for soil, crops and human and animal health. In the case of the municipality of Atlixco, Puebla, municipal wastewater generated that is discharged to the body of water Cantarranas, which irrigates the agricultural area of Santa Ana Coatepec, municipality of Huaquechula. To reduce the pollution problem, Atlixco City Council, through SOAPAMA and CONAGUA, installed a wastewater treatment plant. Since its implementation, studies have not been carried out to show the effects of the treated waters on the natural resources of agricultural use and the population. Therefore, the objective was to measure water quality and the effect on soil and agricultural crops as well as the perception of producers on the effects on soil, agricultural crops and their health. Analysis carried out based on NOM-001-SEMARNAT-1996, observing that the quality of the effluent complies with the official regulations. The agronomic quality of the points sampled shows that their use should be restricted. Soil sampling based on NOM-021-RECNAT-2000 showed that the immediate point of irrigation presents salinity problems. Sampling in zucchini, huauzontle and lemon tea grass resulted in the presence of traces of heavy metals. Lead was found in tolerable amounts and nickel in toxic percentages. The producers perceive that the water is contaminated; it affects positively the soil and the plant, although this one is more susceptible to plagues. In their health, they perceive irritation in the skin.

Key words: Crop quality, peasant perception, RWTP, soil quality, water treated quality.

## DEDICATORIA

*A mis padres Salvador (†) y Francisca por su confianza y sabios  
consejos a lo largo de mi vida*

*A mi familia que de una u otra manera siempre me han apoyado*

*A todos mis amigos que siempre estuvieron en las buenas y en las  
malas*

*A Lilian, por su apoyo incondicional, sus consejos y amistad*

*“Aprendí que la valentía no es la ausencia de miedo, sino el triunfo  
sobre el miedo. El hombre valiente no es el que no siente miedo, sino  
aquel que conquista ese miedo”*

*Nelson Mandela*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en todo momento y permitirme cumplir las metas que me he propuesto.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico proporcionado para la realización de mis estudios de Maestría.

Al Colegio de Postgraduados Campus Puebla, por permitirme realizar mis estudios en sus instalaciones, así como al personal administrativo y docente por su apoyo y facilidades durante mi estancia.

A mi consejero particular, Dr. Ignacio Ocampo Fletes, por su invaluable apoyo y conocimientos brindados durante mi estancia en la maestría, así como su dirección y aportaciones en el presente trabajo de investigación.

A los asesores de mi consejo particular, los Doctores: Mario Alberto Tornero Campante y Eduardo González Flores y la Dra. Sonia Emilia Silva Gómez, agradezco su apoyo en la elaboración y revisión de esta investigación.

Al Sistema Operador de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Atlixco (SOAPAMA), al Lic. Luis Enrique Coca Vázquez, director general, al Ing. Iovanni León Aguilar, director de operaciones e infraestructura, a la TS. Araceli Martínez Jiménez, jefa la unidad de difusión y cultura del agua y al Ing. Alfonso Tapia Gómez, jefe de la planta de tratamiento de aguas residuales, por su apoyo y facilidades para la realización de este trabajo de investigación.

A las autoridades de la comunidad de Santa Ana Coatepec, C. Apolonio Hernández Pérez, presidente auxiliar, C. Edgar Ricardo Morales Luna, presidente del comisariado ejidal, a los C. Francisco Luna, Genaro Segundo, Fortunato Munive y

Anastasio Domínguez, representantes de los comités de agua, por compartir sus experiencias y conocimiento y su apoyo para la etapa de muestreo y levantamiento de encuestas.

A los productores usuarios del agua residual tratada por su participación y apoyo.

A mi familia y a todas y cada una de las personas que contribuyeron directa e indirectamente en la realización de este trabajo.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Justificación.....	4
1.2 Problema de investigación.....	6
1.3 Objetivos e hipótesis.....	9
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA.....	11
2.1 Problemática del agua residual y su reúso.....	11
2.2 Descripción de área de estudio.....	13
2.2.1 Municipio de Atlixco.....	14
2.2.2 Municipio de Huaquechula.....	20
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.....	25
3.1 La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH).....	29
3.2 Enfoque Ecosistémico (EE).....	33
3.3 Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER).....	37
3.4 Principales teorías de gestión de los recursos.....	39
3.4.1 Gestión orientada al Estado.....	39
3.4.2 Gestión orientada al Mercado.....	40
3.4.3 Gestión orientada a la Comunidad.....	42
3.5 Características del agua desde la perspectiva del Estado.....	43
3.6 La gestión del agua en México.....	49
3.6.1 Los Organismos Operadores del Agua en México.....	50
3.7 El uso de aguas residuales.....	52
3.7.1 Uso agrícola de las aguas residuales.....	53
3.7.2 Calidad del agua.....	54
3.7.3 Calidad del agua de riego.....	57
3.7.4 Metales pesados.....	58
3.8 Absorción de metales pesados en suelo y planta.....	62
3.9 Teorías sobre la percepción.....	63

3.9.1 Teoría asociacionista.....	63
3.9.2 Teoría de la Gestalt.....	63
3.9.3 Percepción ambiental.....	64
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA.....	66
4.1 Caracterización de la zona de estudio.....	66
4.1.1 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Atlixco.....	66
4.1.2 Zona agrícola de Santa Ana Coatepec.....	72
4.2 Técnicas de investigación.....	73
4.2.1 Enfoque técnico.....	74
4.2.1.1 Operacionalización de variables.....	75
4.2.1.2 Muestreo de agua.....	76
4.2.1.3 Muestreo de suelo.....	79
4.2.1.4 Muestreo de planta.....	82
4.2.1.5 Organización y análisis de la información.....	84
4.2.1.5.1 Calidad del agua.....	84
4.2.1.5.2 Calidad del suelo.....	87
4.2.1.5.3 Calidad de la planta.....	87
4.2.2 Enfoque social.....	87
4.2.2.1 Técnicas de investigación.....	87
4.2.2.2 Organización y análisis de la información.....	88
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	89
5.1 Calidad del agua.....	89
5.1.1 Calidad agronómica del agua.....	92
5.2 Efecto suelo-planta por el uso de agua tratada.....	99
5.2.1 Propiedades químicas del suelo.....	100
5.2.2 Contenido de metales pesados disponibles en suelo.....	101
5.2.3 Concentración de metales pesados en cultivos.....	103
5.3 Percepción de los productores respecto a los efectos del agua residual tratada por la PTAR Atlixco.....	107
5.3.1 Características de los productores.....	108
5.3.2 Régimen, distribución y uso de la tierra.....	110

5.3.3 Origen, distribución y manejo del agua.....	111
5.3.4 Conocimiento sobre el origen y la calidad del agua del canal.....	112
5.3.5 Percepción de los productores sobre los efectos del agua tratada.....	114
5.3.6 Percepción de los productores sobre la participación de la PTAR.....	115
5.3.7 Prueba de hipótesis.....	118
5.4 Análisis integral del estudio.....	121
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	126
BIBLIOGRAFÍA.....	131

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Población del municipio de Atlixco.....	19
Cuadro 2.	Población del municipio de Huaquechula.....	24
Cuadro 3.	El derecho humano al agua y al saneamiento. Hitos.....	25
Cuadro 4.	Modelos de gestión del agua.....	43
Cuadro 5	Operacionalización de variables.....	76
Cuadro 6	Especificaciones técnicas de muestreo y preservación de muestras NOM-001-SEMARNAT-1996.....	78
Cuadro 7.	Normas y métodos de análisis de aguas residuales.....	79
Cuadro 8.	Datos sobre muestreo de suelo.....	81
Cuadro 9.	Datos sobre muestreo de planta.....	83
Cuadro 10.	Comparación de parámetros analizados con normatividad nacional e internacional.....	90
Cuadro 11.	Parámetros fisicoquímicos primer muestreo (abril 2015).....	93
Cuadro 12.	Parámetros fisicoquímicos segundo muestreo (septiembre 2015).....	95
Cuadro 13.	Salinidad potencial.....	99
Cuadro 14.	Propiedades químicas de las parcelas estudiadas.....	100
Cuadro 15	Parámetros químicos establecidos en suelo NOM-021-SEMARNAT-2000.....	101
Cuadro 16	Concentración de metales pesados en suelo y su comparación con la normatividad vigente, nacional e internacional.....	102
Cuadro 17	Concentración de metales pesados (Pb, Ni), en tejido vegetal de calabacita, huauzontle y té limón.....	103
Cuadro 18.	Nivel de escolaridad de los productores usuarios del agua de Santa Ana Coatepec, Huaquechula, Puebla.....	110
Cuadro 19	Cultivos irrigados con agua del canal principal compuerta “El Potrero”.....	112
Cuadro 20.	Calidad del agua del canal en percepción de los productores.....	114

Cuadro 21.	Percepción de los productores referente al beneficio de tratar las aguas residuales.....	116
Cuadro 22.	Propuestas de participación para mejorar la calidad del agua.....	118
Cuadro 23	Contraste de variables de percepción.....	119
Cuadro 24	Prueba de Chi cuadrada.....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localización de la zona de estudio.....	14
Figura 2.	Climas del municipio de Atlixco.....	16
Figura 3.	Edafología del municipio de Atlixco.....	18
Figura 4.	Uso de suelo en el municipio de Atlixco.....	19
Figura 5.	Climas del municipio de Huaquechula.....	21
Figura 6.	Edafología del municipio de Huaquechula.....	22
Figura 7.	Uso de suelo en el municipio de Huaquechula.....	23
Figura 8.	Zona de estudio.....	66
Figura 9.	Tratamiento primario. Caja de disipación (1), Rejillas (2), Desarenadores (3).....	67
Figura 10.	Canal de desarenado.....	67
Figura 11.	Cárcamo de bombeo.....	68
Figura 12.	Módulos del reactor UASB.....	68
Figura 13.	Válvulas de control de reactor UASB.....	69
Figura 14.	Tratamiento secundario. Filtro percolador (1), Panel plástico (2), Tanque de recirculación (3).....	70
Figura 15.	Sedimentadores.....	70
Figura 16.	Tanque de contacto con cloro.....	71
Figura 17.	Manejo de lodos.....	72
Figura 18.	Sistemas identificados en la zona de estudio.....	74
Figura 19.	Ubicación de puntos de muestreo.....	75
Figura 20.	Determinación de parámetros <i>in situ</i> .....	77
Figura 21.	Muestreo y preservación de muestras.....	78
Figura 22.	Proceso de muestreo de suelo.....	81
Figura 23.	Muestreo de suelo.....	81
Figura 24.	Muestreo de planta.....	82
Figura 25.	Proceso de muestreo de planta.....	83
Figura 26.	Muestras preparadas para su análisis.....	83

Figura 27.	Resultados de DBO <sub>5</sub> comparado con la Norma Oficial Mexicana y Normas internacionales.....	91
Figura 28.	Contenido de Pb en efluente y punto de riego, en comparación con normatividad nacional e internacional.....	91
Figura 29.	Contenido de Ni en efluente y punto de riego, en comparación con normatividad nacional e internacional.....	92
Figura 30.	Iones primer muestreo, abril 2015.....	94
Figura 31.	Iones segundo muestreo, septiembre 2015.....	97
Figura 32.	Concentración de plomo (Pb) en materia seca en calabacita ( <i>Cucurbita pepo</i> ).....	104
Figura 33.	Concentración de níquel (Ni) en materia seca en calabacita ( <i>Cucurbita pepo</i> ).....	104
Figura 34.	Concentración de plomo (Pb) en materia seca en huauzontle ( <i>Chenopodium nuttalliae</i> ).....	105
Figura 35.	Concentración de níquel (Ni) en materia seca en huauzontle ( <i>Chenopodium nuttalliae</i> ).....	105
Figura 36.	Concentración de plomo (Pb) en materia seca en té limón ( <i>Cimnopogon citratus</i> ).....	106
Figura 37.	Concentración de níquel (Ni) en materia seca en té limón ( <i>Cimnopogon citratus</i> ).....	106
Figura 38.	Edad de los productores.....	109
Figura 39.	Régimen de propiedad.....	110
Figura 40.	Superficie que poseen los productores.....	111
Figura 41.	Percepción de los productores sobre el agua que ingresa a la PTAR.....	113
Figura 42.	Percepción de los productores sobre el agua del canal.....	113
Figura 43.	Percepción de los productores sobre la recepción de agua de la PTAR.....	115
Figura 44.	Percepción de los productores sobre la cantidad y calidad del agua.....	116
Figura 45.	Opinión de los productores por lo que se deben tratar las aguas	

	residuales.....	117
Figura 46.	Ruta de migración de contaminantes.....	121
Figura 47.	Sistema agua-suelo-planta.....	122
Figura 48.	Concentración de plomo en agua-suelo-planta.....	123
Figura 49.	Concentración de cadmio en agua, suelo y planta.....	123
Figura 50.	Concentración de níquel en agua, suelo y planta.....	124

## INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento importante en la naturaleza e indispensable para la vida humana (Anton y Díaz, 2000), ya que compone la mayor parte de los organismos vivos; es utilizada casi en toda clase de actividades humanas entre ellas diferentes procesos industriales, generación de energía eléctrica y principalmente en la agricultura (Enkerlin *et al.*, 1997).

A nivel mundial se estima la disponibilidad de agua promedio anual en 1,386 millones de kilómetros cúbicos. De ésta, 35 millones de kilómetros cúbicos son agua dulce (2.5%), de la cual, el 70% no está disponible por encontrarse en glaciares, hielo y nieve. El volumen de agua subterránea es de 10.5 millones de kilómetros cúbicos y solamente 135 mil kilómetros se encuentran en lagos, ríos, humedad en suelo, aire, humedales, plantas y animales (CONAGUA, 2012a).

Actualmente, a la par el crecimiento de la población y el uso del agua se han incrementado de manera considerable. Ante un recurso limitado y con problemas de contaminación, se advierte que para evitar una crisis deben tomarse medidas preventivas, tales como conservar el agua, reducir la contaminación y regular su uso. Un problema creciente es la baja calidad del agua por problemas de contaminación, clasificada por el tipo de escurrimiento, contaminante físico, químico o biológico y por el impacto que genera al medio ambiente (Enkerlin, 1997).

A nivel mundial, el principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes generalmente fósforo y nitrógeno que afecta sustancialmente al agua. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas que también son fuente de contaminación microbiana, de efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles (FAO, 2013a).

Las ciudades son la principal fuente de contaminación del agua, después de utilizar el recurso lo desechan en forma de agua residual homogeneizándola con las corrientes naturales, que generalmente son empleadas en el riego de cultivos. La descontaminación de las aguas residuales es esencial para preservar los ecosistemas, la biodiversidad y la salud humana.

México no está exento de problemas de disponibilidad de agua (en 1910 era de 31,000 m<sup>3</sup> por habitante, para 2010 disminuyó a 4 230 m<sup>3</sup> anuales per cápita), y de contaminación de aguas superficiales y subterráneas por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos, induciendo al reúso de agua en la agricultura, práctica conocida en el país (Escalante *et al.*, 2003).

La agricultura es la actividad primaria que genera una gran demanda de agua (Silva *et al.*, 2008; Alexandratos, 1995; Ayers y Westcot 1976; Guadarrama & Galvan, 2015). En la actualidad el uso agrícola de aguas contaminadas es alto, ya que es una forma eficiente para conservar dicho recurso, reciclar nutrientes y reducir la contaminación, sin embargo existen significativos riesgos para la salud asociados con el uso de aguas residuales no tratadas.

Ante la problemática anterior, una alternativa empleada para la descontaminación del agua son las plantas de tratamiento de aguas residuales, que utilizan diversas técnicas de saneamiento; una de las más empleadas es la de lodos activados, tratamiento biológico de aguas residuales que emplean microorganismos para llevar a cabo la descomposición de los residuos (Marín & Osés, 2013).

Por lo anterior, es importante conocer la calidad del agua que se emplea para la producción agrícola en regiones específicas, como el caso de la región de Atlixco, Puebla, importante por su dinámica agrícola diversificada y por su producción bajo condiciones de riego (Ocampo, 2004), en donde sus principales fuentes de recurso hídrico provienen de aguas superficiales con problemas de contaminación como lo han mostrado diferentes estudios (Silva *et al.*, 2002; Neri, 2008). Un estudio más

reciente realizado por parte de la red de monitoreo de la Comisión Nacional del Agua, reporta al menos 10 puntos de muestreo sobre el municipio de Atlixco con problemas de contaminación en indicadores de calidad como son: coliformes fecales (C. F.); demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ); demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos totales suspendidos (SST) (CONAGUA, 2013a).

Hacer uso de agua contaminada tiene efectos en otros recursos naturales como el suelo y los cultivos agrícolas, así como en la salud de la población, situación que demanda realizar un monitoreo constante. En este sentido el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua tratada y el efecto generado en suelo, planta y la salud de los usuarios, así como conocer estos efectos en la percepción de los productores respecto a las aguas residuales tratadas por la Planta Tratadora de Aguas Residuales (PTAR) de Atlixco, Puebla.

# CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## 1.1 Justificación

La relación entre lo rural y lo urbano es muy estrecha debido a los intercambios de bienes y servicios que existen entre ambos. Desde una perspectiva de cuenca hidrográfica las ciudades dependen de los servicios ambientales que les proporcionan las cuencas a las que pertenecen o las adyacentes a ellas. Por lo tanto, la forma en que disponen de sus aguas residuales no tratadas tendrá un impacto en las partes bajas de la cuenca o en las aledañas. Estas situaciones representan para los territorios contiguos oportunidades o amenazas según el tipo de relación que se establezca (Pare, 2010).

Frente a los problemas ambientales y sociales complejos que enfrenta la sociedad, se plantea avanzar hacia la sostenibilidad de los ecosistemas y mantener en buen estado los recursos naturales, con principios ecológicos de respeto al medio ambiente, la implementación de tecnologías sustentables, la participación de la sociedad, entre otros (Gleason, 2012).

En la actualidad un recurso natural que enfrenta graves problemas es el agua. Escasez y contaminación son los dos desafíos, por lo que el reúso de agua residual tratada se ha vuelto un recurso valioso y su demanda irá en aumento conforme la disponibilidad disminuya e incremente la necesidad de primer uso. El agua residual tratada para su reúso debe reunir una determinada calidad, que está en función de la actividad a la cual se dirige para su aprovechamiento y manejo (Escalante *et al.*, 2003; Veliz *et al.*, 2009).

Lo anterior implica que la sociedad en general realice cambios profundos en los valores, modelos y modos de vida; reconociendo el papel fundamental del agua como soporte ecosistémico y su valor socio-ambiental integral, dentro de los

principios de equidad y justicia, en lo que se refiere a la adaptación, asimilación hacia una nueva cultura del agua, y en este enfoque los organismos gubernamentales tienen un papel fundamental (Martínez, 1976; Perevochtchikova, 2010). La implementación de alternativas para dar un tratamiento a los efluentes contaminados es una necesidad, debido a que la mayor parte de éste ingresa a los cauces o directamente a los cultivos sin tener un previo tratamiento.

La reutilización del agua residual depurada se basa esencialmente, en aprovecharla como agua de riego y/o como agua de recarga con objeto de incrementar los recursos hídricos de un sistema acuífero. Esta reutilización puede evitar muchos de los problemas que ocasiona el vertido de estas aguas en cauces superficiales o en el mar, como son riesgos sanitarios, cambios en las características organolépticas, eutrofización, etc. (Esteller, 2002; Hendricks, 2010; Winpenny *et al.*, 2013).

El municipio de Atlixco y sus alrededores se ha caracterizado desde tiempos prehispánicos por su dinámica agrícola (Ocampo, 2004). Tan solo en 2011 se reportó una superficie sembrada de 11,790 hectáreas de cultivos de flores, aromáticos, hortalizas, forrajes, granos principalmente (INEGI, 2011b), de esta superficie 6,186 ha se encuentran bajo condiciones de riego, las cuales se abastecen de los Ríos Nexapa, Cantarranas y pozos profundos. Las agua superficiales que pasan por la zona urbana presentan cierto grado de contaminación con coliformes fecales en una escala de 155 a 2,400 número más probable (NMP) L<sup>-1</sup>; demanda bioquímica de oxígeno por encima de los 6 mg L<sup>-1</sup>; demanda química de oxígeno (DQO) desde 58.6 mg L<sup>-1</sup> hasta 296.8 mg L<sup>-1</sup>; sólidos totales suspendidos de 40.5 a 499 mg L<sup>-1</sup> (CONAGUA, 2013a).

Ante este problema, el Ayuntamiento de Atlixco, a través del Sistema Operativo de Agua Potable y Alcantarillado (SOAPAMA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), instalaron una Planta Tratadora de Agua Residuales (PTAR), con el objetivo de proporcionar la calidad para reusarla en actividades agrícolas y de

jardinería. De aquí, la necesidad de evaluar su calidad para uso en el riego agrícola, considerando que un volumen de agua tratada se usa en esta actividad. También resulta importante conocer la percepción de los productores que reciben el agua tratada una vez que pasa por la planta de tratamiento.

## **1.2 Problema de investigación**

Actualmente el agua es un recurso en deterioro, principalmente por la contaminación. Una de las actividades más demandantes de este recurso es la agricultura, ya que se estima que alrededor del 70% de las extracciones de agua dulce y más del 90% de su uso consuntivo, son empleadas en esta actividad (FAO, 2013b). Para satisfacer las necesidades de esta actividad, una alternativa es el reúso de aguas residuales.

El uso de aguas residuales en la agricultura provenientes de comunidades urbanas e industrias, es cada vez más frecuente; esto genera un impacto en la salud y en el medio ambiente. Se estima que a nivel nacional se generan  $7.458 \cdot 10^9$  metros cúbicos de aguas residuales por año (AQUASTAT, 2012), este recurso se utiliza en diversas actividades, una de las más importantes es el riego agrícola. A nivel nacional, alrededor de 35,000 ha son irrigadas con este tipo de aguas.

Una de las alternativas empleadas para el saneamiento de las aguas residuales son las plantas de tratamiento de aguas residuales, que manejan diversos procesos de tratamiento, como: Aerobio, Anaerobio, Biológico, Discos biológicos, Dual, Filtros Biológicos o Rociadores o Percoladores, Fosa Séptica, Fosa Séptica + Filtro Biológico, Fosa Séptica + Wetland, Humedales (Wetland), Lagunas Aireadas, Lagunas de Estabilización, Lodos Activados, Primario Avanzado, Primario o Sedimentación, Rafa + Filtro Biológico, Rafa o Wasb, Rafa,, Wasb + Humedal, Reactor Enzimático, Sedimentación + Wetland, Tanque Imhoff, Tanque Imhoff + Filtro Biológico, Tanque Imhoff + Wetland, Terciario, Zanjales de Oxidación (CONAGUA, 2013b).

Sin embargo, ambientalmente las plantas de tratamiento que existen utilizan en su mayoría tecnologías contaminantes, altas en uso de energía, que producen desechos tóxicos como resultado de su operación. Es evidente que la infraestructura que se tiene en el país para hacerse cargo del tratamiento de las aguas negras no es suficiente para cubrir las necesidades, además de que es ineficiente en su operación como lo demuestran las cifras de capacidad instalada en comparación con las de caudal tratado, que son menores (Lahera, 2010).

México cuenta con 2,287 plantas de tratamiento de agua residual, que equivalen a una capacidad instalada de 152,171.88 litros por segundo ( $L s^{-1}$ ), los cuales dan tratamiento a  $105,934.85 L s^{-1}$  para alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 50.2% (CONAGUA, 2013b), en este rubro el proyecto más importante que se tiene en México es la construcción de planta de de tratamiento de aguas residuales Atotonilco, que tratará el 60% de las aguas residuales de la Ciudad de México, las cuales se emplearán posteriormente para riego. Con el procesamiento de las aguas se beneficiarán 700,000 personas que viven en el Valle de México, de las cuales 300,000 habitan en zonas de irrigación (CONAGUA, 2012b).

En el país existen varias zonas de importancia agrícolas que son irrigadas con aguas residuales o tratadas, como el Valle de Atlixco, Puebla, donde el Río Nexapa ha sido objeto de diversos estudios sobre contaminación. Al respecto Silva *et al.* (2002) en un estudio realizado en la región encontraron que el agua presenta contaminación. Algunos de los factores adversos son: los patrones de consumo generadores de gran volumen de desechos, la capacidad de carga y resistencia de los ecosistemas; la falta de acciones municipales para incrementar la capacidad de regeneración de los ecosistemas circundantes y la deficiencia de plantas tratadoras de aguas residuales.

Por otra parte, Navarro (2007), realizó una investigación en la cual encontró que las aguas del Río Nexapa durante el periodo 1995-2005, mostraron una tendencia

negativa en cuanto a calidad de sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Esto indica la necesidad de trabajar en la instalación y puesta en marcha de las plantas de tratamiento de los dos núcleos urbanos que aportan la mayor cantidad de aguas residuales a las corrientes de agua superficial, efímera o perenne, incluyendo las acequias de riego.

Otros estudios realizados en el municipio de Atlixco en el canal de Santa Lucía (Ocampo, 1994), el canal de riego de San Félix Hidalgo (Ocampo, 2004) y en el canal Chilhucán (Neri, 2008), muestran la mala calidad del agua de riego. Estos trabajos revelan que el agua se encuentra en un estado crítico respecto a calidad y cantidad, poniendo en riesgo la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, base de la dinámica económica, social y productiva de la región.

Ante la problemática de la contaminación del agua superficial, causada por el vertido de agua residual sin tratar a los cuerpos de agua que abastecen a la zona agrícola de la región, el gobierno municipal optó por la instalación de una planta tratadora de aguas residuales con el objetivo de evitar que millones de litros de aguas negras sean descargados en las fuentes de agua que van a dar a los campos de cultivo. Dicha planta se encuentra en el municipio de Atlixco y lleva el mismo nombre y entró en operación en el 2011; el cuerpo receptor o de reúso es el Río Cantarranas; el proceso que maneja son lodos activados y tiene una capacidad instalada de  $150 \text{ L s}^{-1}$  utilizando actualmente el 50% de su capacidad (CONAGUA, 2011).

La región de Atlixco se caracteriza por su dinámica agrícola, siendo uno de sus recursos para el riego el agua residual con los riesgos que puede traer para la salud de las personas, tanto para las que manejan el agua como para las que consumen los productos agrícolas. Ante esta situación con la puesta en marcha de la Planta Tratadora de Aguas Residuales surgió la necesidad de estudiar los parámetros de

calidad del influente<sup>1</sup> y efluente<sup>2</sup> de la planta tratadora y los efectos en el suelo agrícola y los cultivos regados con esta agua. También resultó importante escuchar a los usuarios del agua respecto a efectos observados.

Con base en lo anterior surgió la siguiente interrogante: ¿El agua residual tratada posee la calidad adecuada para ser empleada en el riego agrícola, y su reúso beneficia al suelo y a los cultivos sin afectar la salud de los productores?

### **1.3 Objetivos e Hipótesis**

#### Objetivo general

Evaluar la calidad del agua residual tratada por la planta tratadora de aguas residuales de Atlixco, Puebla, y sus efectos en suelo y cultivos, así como la percepción de los productores respecto a los efectos al emplearla en el riego agrícola.

#### Objetivos específicos

1. Caracterizar mediante las normas oficiales mexicanas e internacionales la calidad del agua del influente y efluente de la planta tratadora de aguas residuales y el efluente que ingresa a las parcelas para riego agrícola.
2. Caracterizar la calidad del suelo irrigado con agua residual tratada.
3. Determinar la presencia de metales pesados Pb, Cd y Ni, en los tres cultivos más importantes que se riegan con agua tratada.
4. Conocer la percepción de los productores respecto a los efectos que han percibido al usar aguas tratadas.

---

<sup>1</sup> Influyente: flujo de agua residual que entran en una depuradora o que son sometidas a un proceso de tratamiento.

<sup>2</sup> Efluente: flujo de agua residual tratada que sale del proceso de depuración.

## Hipótesis general

La calidad del agua residual tratada cumple con la normativa oficial mexicana e internacional para su uso agrícola, contribuyendo al mejoramiento de la calidad del suelo sin afectar los cultivos, y en percepción de los productores los efectos son positivos.

## Hipótesis Específicas

1. La calidad del agua proveniente de la planta tratadora de agua residual Atlixco cumple con la normatividad oficial para su aprovechamiento en riego agrícola.
2. El uso de agua residual tratada mejora la calidad del suelo agrícola.
3. No existe presencia de metales pesados (Pb, Cd y Ni) en cultivos que usan aguas tratadas.
4. El uso de aguas tratadas beneficia al suelo y a los cultivos y no ocasiona problemas a la salud de acuerdo a la percepción de los productores.

## **CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA**

En este capítulo se hace un análisis de la situación del agua residual y su reúso en actividades agrícolas y se describen las características físicas de los municipios de Atlixco, lugar de operación de la Planta Tratadora de Aguas Residuales y del municipio de Huaquechula, donde se localiza la comunidad Santa Ana Coatepec, que utiliza las aguas tratadas.

### **2.1 Problemática del agua residual y su reúso**

La rápida urbanización trae consigo varios retos relacionados con los problemas de calidad del agua y el saneamiento. En la mayoría de los países de ingresos bajos las aguas residuales se vierten directamente al mar o a ríos sin tratamiento alguno. La descarga de aguas residuales no tratadas ocasiona problemas a las zonas situadas río abajo. La buena gestión de las aguas residuales puede, en vez de ser una fuente de problemas, ser una cuestión positiva para el medio ambiente y conducir a mejorar la seguridad alimentaria, la salud y el desarrollo económico (ONU, 2010).

Las aguas residuales directa o indirectamente riegan 20 millones de hectáreas de tierras a nivel mundial, casi el 7% de la superficie total de regadío. La contaminación del agua, a pesar de las mejoras en algunas regiones, va en aumento a nivel mundial. Aunque se hagan progresos sustanciales en la regulación y la implementación, se espera que la contaminación aumente como consecuencia del desarrollo económico impulsado por la urbanización, las industrias y los sistemas de agricultura intensiva. La contaminación del agua generada por el hombre es una amenaza grave para la salud humana y para el ecosistema, pero su impacto es difícil de cuantificar. Los asentamientos urbanos son el principal causante de la contaminación de las fuentes de agua (ONU, 2010).

En México se irrigan alrededor de 35,000 ha de cultivos agrícolas con aguas residuales. La problemática referente al manejo y uso de aguas residuales ha obligado a los gobiernos a establecer medidas regulatorias. En 1997 y 1998 se promulgaron las normas oficiales mexicanas (NOM), actualmente vigentes, sobre descargas de aguas residuales. Son decretos federales de obligado cumplimiento, que establecen los límites de descarga (vertido) de aguas residuales a los diferentes cuerpos de agua, así como a las redes de alcantarillado: NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996 1, respectivamente. Estas normas suponen un marco regulador unificado para todos los municipios y usuarios de las redes de alcantarillado.

Los límites de descarga de aguas residuales municipales a cuerpos receptores se establecieron en función de los cuerpos de agua, mientras que la descarga a alcantarillado se unificó y ya no dependió de la actividad de la industria; se derogaron normas anteriores que establecían la normativa de descarga según el ramo industrial. Los límites establecidos por las NOM mencionadas son en general bastante permisivos. Sin embargo, establecieron un marco normativo generalizado y un calendario escalonado de implantación de la norma, que debía favorecer la generalización del saneamiento integral de las aguas residuales en el país. Para descargas a cuerpos de agua la NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (Escalas, 2006; Reyes, 2014).

Una de las estrategias para dar saneamiento al volumen de agua residual generada fueron las plantas de tratamiento de aguas residuales. En 1992 México contaba con 394 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, que trataban un caudal de  $30.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de aguas residuales, sobre un total estimado de  $187 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  de aguas residuales recolectadas por las redes de alcantarillado (Escalas, 2006). Es decir, se trataba sólo 19% de las aguas residuales municipales conducidas a los sistemas de alcantarillado. Operaban, por tanto, un número reducido de plantas de tratamiento para las necesidades del país, tratando

un porcentaje reducido del caudal total de aguas residuales. Además, a finales de los años noventa 39% de las plantas de tratamiento estaba fuera de operación, un porcentaje muy elevado. Según diversos expertos del sector, se construyeron un número elevado de plantas de tratamiento que luego los ayuntamientos no podían operar normalmente por falta de recursos económicos y humanos para gestionar su operación (Escalas, 2006). A finales del año 2013, el país contaba con 2,287 plantas de tratamiento de agua residual, que equivalen a una capacidad instalada de 152,171.88 litros por segundo ( $L s^{-1}$ ), los cuales dan tratamiento a 105,934.85  $L s^{-1}$  para alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 50.2 por ciento (CONAGUA, 2013b).

Gracias a que los tres niveles de gobierno han incrementado sus recursos y su compromiso con el tratamiento de las aguas residuales municipales ha sido posible alcanzar un porcentaje razonable. En muchos municipios mexicanos, no existía una estructura adecuada de tarifas del servicio de agua y saneamiento, lo que impedía la autosuficiencia de este servicio (incluido el tratamiento de las aguas residuales). En muchos casos, el municipio tampoco disponía de financiamiento alternativo suficiente para subsidiar los costos de agua potable y saneamiento<sup>3</sup> (Escalas, 2006).

## **2.2 Descripción del área de estudio**

El estudio se realizó en los municipios de Atlixco y Huaquechula, Puebla. En Atlixco se ubica la Planta Tratadora de Aguas Residuales, que da tratamiento a una

---

<sup>3</sup> “El Ramo 016 Medio Ambiente y Recursos Naturales, específicamente en el caso del subsector Agua las prioridades establecidas en el Proyecto de Presupuesto de Egresos de la Federación (PPEF) 2017 presentan un recorte a 14 mil 879 millones de pesos lo que representa una reducción de poco más de 38% respecto al presupuesto aprobado para 2017. El peso del recorte se concentra en el programa PROAGUA mismo que a partir de 2017 será el único programa federalizado existente para atender las necesidades de construcción de infraestructura para la dotación de agua potable, drenaje y saneamiento, el recorte a ese tipo de acciones es de \$9,030,425,862 ya que en el 2016 se contaba con un presupuesto en un orden cercano a los 12 mil 454 millones (entre el PROAGUA y el PROTAR –que para 2017 desaparece–), lo que representa una reducción nominal del 72.5%” (Montoya, 2016).

parte del agua residual municipal. Una vez tratada es vertida al Río Cantarranas que conduce el agua para los campos de cultivo de la comunidad de Santa Ana Coatepec, municipio de Huaquechula (Figura 1).

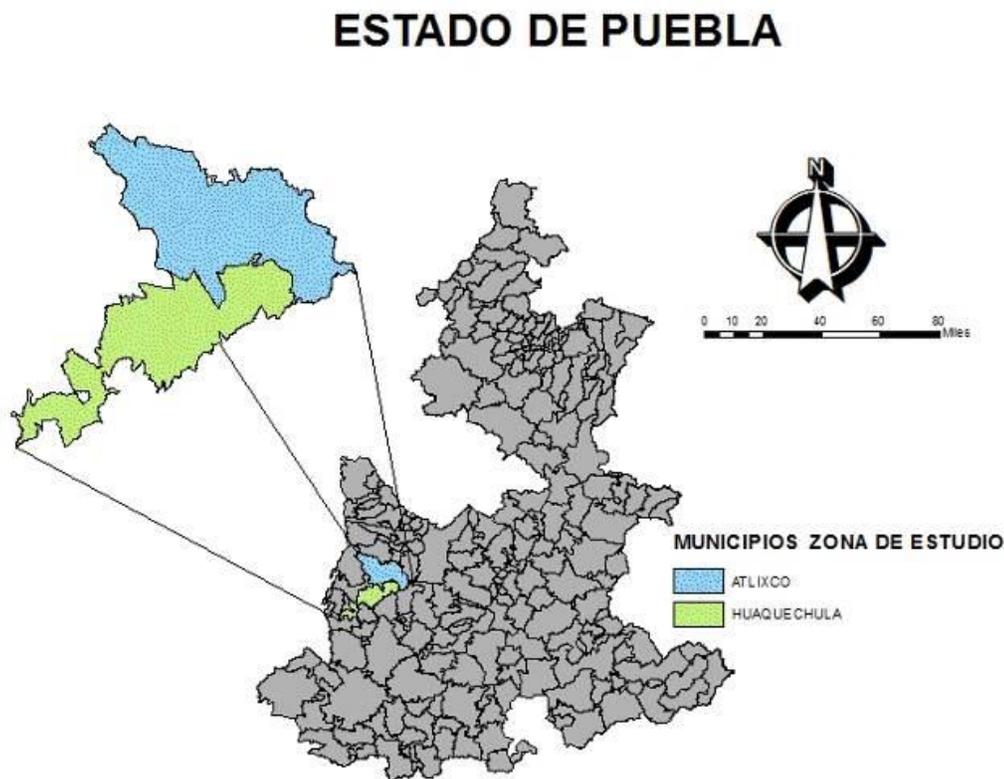


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

### 2.2.1 Municipio de Atlixco

El municipio de Atlixco se localiza en la parte centro Oeste del estado de Puebla. Tiene una altitud entre 1,600 y 3,000 metros sobre el nivel del mar. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 18° 48` y 18° 19` de latitud Norte y los meridianos 98° 19` y 98° 36` de longitud Occidental. El municipio colinda al Norte con el municipio de Tanguismanalco, al Noreste con los municipios de Santa Isabel Cholula y Ocoyucan, al Suroeste con el municipio de Atzitzihuacan, al Sur con los municipios de Huaquechula y Tepeojuma, al Sureste con el municipios de San Diego la Meza

Tochimiltzingo, al Este con la Ciudad de Puebla, y al Oeste con el municipio de Tochimilco. Tiene una superficie de 293.01 kilómetros cuadrados (INEGI, 2009a).

## **Orografía**

El territorio del municipio se encuentra comprendido dentro de dos unidades morfológicas divididas por la cota 2,000 que atraviesa el Noroeste; hacia el Noroeste se encuentra el valle de Puebla, y de la cota hacia el Este, el valle de Atlixco; ambos descienden de las faldas meridionales de la Sierra Nevada (INEGI, 2009a).

La Orografía del terreno muestra su menor altura al Sur con 1,700 metros sobre el nivel del mar; conforme se avanza el Noroeste, el nivel del terreno va ascendiendo suavemente, por ser estribaciones del Volcán Iztaccíhuatl; así, el extremo Noroeste alcanza la cota de 2,500 metros (INEGI, 2009a).

Al Sureste, aparecen formaciones montañosas aisladas que culminan en los cerros de Zoapiltepec y Texistle, que alcanzan un nivel superior a los 2,100 metros sobre el nivel del mar; también existen unos cerros aislados al Norte, como el Pochote, Tecuitlacuelo, loma La Calera, el Charro (INEGI, 2009a).

## **Hidrografía**

El municipio pertenece a la subcuenca del Río Nexapa, afluente del Atoyac, es regado por numerosas corrientes que provienen de las estribaciones del Iztaccíhuatl, siendo la principal el Río Nexapa, uno de los pocos de carácter permanente y que cruza por la mitad del valle de Atlixco. Otras corrientes importantes son: el Cuescomate que cruza la ciudad de Atlixco, el Río Molino y el Río Palomas. Las numerosas corrientes temporales, originadas por deshielos del volcán, forman una gran cantidad de barrancas al Noroeste (INEGI, 2009a).

## Clima

El municipio se ubica en la parte centro del estado, presenta la transición entre los climas templados del Norte del estado y los cálidos del sur; presenta dos variantes de clima: templado y cálido, como se observa en la Figura 2.



Figura 2. Climas del municipio de Atlixco

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

Semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w<sub>1</sub>)), temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T<sup>4</sup> entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual. Semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w<sub>0</sub>)), con lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Templado, subhúmedo (C(w<sub>1</sub>)), temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total

<sup>4</sup> Relación precipitación- temperatura

anual. Templado, subhúmedo (C (w<sub>2</sub>)), con lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Semifrío, subhúmedo (Cb'(w<sub>2</sub>)) con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual (INEGI, 2009a; García, 1998).

## **Edafología**

El Municipio presenta una gran variedad, pues se pueden identificar 5 tipos de suelo (INEGI, 2009a, INEGI, 2004) (Figura 3):

**Suelo Fluvisol:** se caracterizan por estar formados de materiales acarreados por agua. Son suelos muy poco desarrollados, medianamente profundos y presentan generalmente estructura débil o suelta. Es el suelo que mayor extensión ocupa y coincide aproximadamente con las zonas planas del Poniente.

**Suelo Regosol:** tienen poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica. Se encuentra al Noroeste y Norte coincidiendo con las estribaciones de la Sierra Nevada; también ocupa un área restringida del extremo Sur.

**Suelo Feozem:** se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Se presenta en las zonas planas del Noreste, ocupando una Extensión considerable.

**Suelo Cambisol:** estos suelos son jóvenes, poco desarrollados y se pueden encontrar en cualquier tipo de vegetación o clima excepto en los de zonas áridas. Se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa con terrones que presentan vestigios del tipo de roca subyacente y que además puede tener pequeñas acumulaciones de arcilla, carbonato de calcio, fierro o manganeso. Se ubica en el extremo Noroeste cubriendo un área reducida.

Suelo Rendzina: se caracterizan por tener una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Se identifican en la mayor parte de la zona montañosa del Sureste.

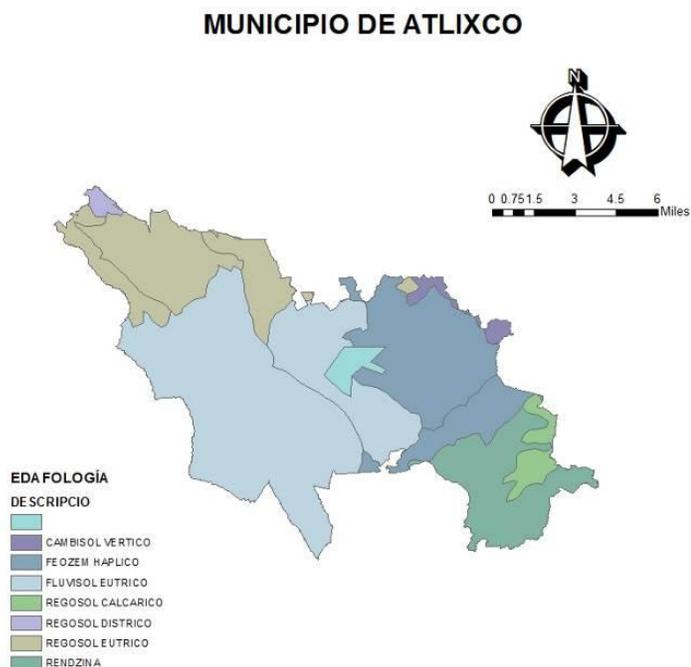


Figura 3. Edafología del municipio de Atlixco

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

### Uso de suelo y vegetación

La mayor parte de las zonas planas del municipio están dedicadas a la agricultura del riego, constituyendo un área de 4,748 ha. Entre los principales cultivos se encuentran: maíz de grano, frijol, hortalizas, aromáticos y flores (INEGI, 2011b)

Al Noroeste en las estribaciones de la Sierra Nevada, se ha introducido agricultura de temporal, es evidente la enorme deforestación que se ha producido en esta zona, repitiéndose un proceso muy común al sustituir áreas boscosas, en este caso pinos y cedros, para introducir una agricultura de subsistencia en los suelos no aptos para estas actividades y que tienden a agotarse por este mal uso. Aún subsisten pequeñas áreas al Norte y Noreste, ocupadas por cedros y pinos, testigos

de la vegetación natural. Finalmente, se pueden apreciar pequeñas áreas de pastizal inducido, así como matorrales encinosos al Sureste (Figura 4) (INEGI, 2009a).

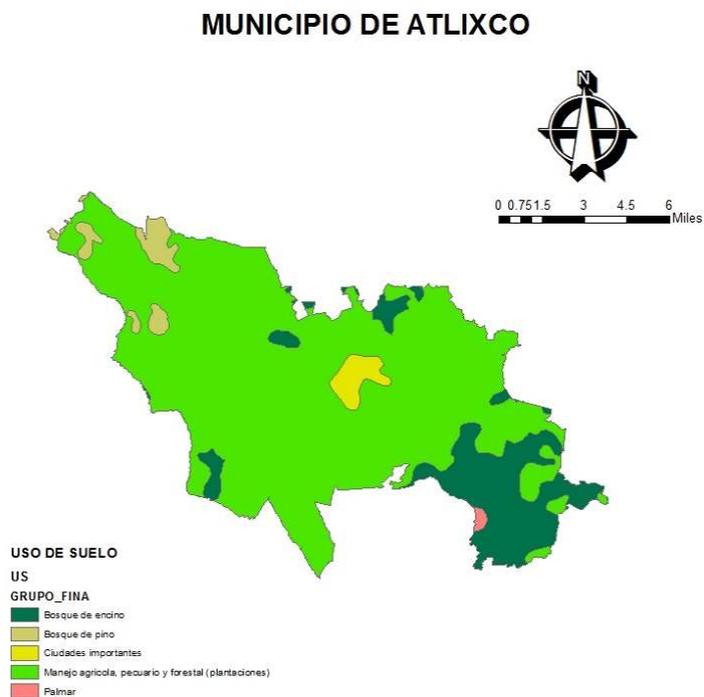


Figura 4. Uso de suelo en el municipio de Atlixco

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

## Población

Atlixco contaba con una población total de 127,062 habitantes según el último censo realizado en 2010 por INEGI (Cuadro 1) (SEDESOL, 2013).

Cuadro 1. Población del municipio de Atlixco

	<b>Año</b>	<b>Año</b>
	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Hombres	56,813	59,360
Mujeres	65,336	67,702
<b>Total</b>	<b>122,149</b>	<b>127,062</b>

Fuente: SEDESOL (2013)

## **2.2.2 Municipio de Huaquechula**

El municipio de Huaquechula se localiza en la parte centro Oeste del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 18° 40' 06" y 18° 51' 48" de latitud Norte y los meridianos 98° 21' 18" y 98° 39' 36" de longitud Occidental. El municipio colinda al Norte con los municipios de Atzitzihuacan y Atlixco, al Sur con el municipio de Tlapanala, al Este con el municipio de Tepeojuma, al Oeste con el municipio de Tepemaxalco. Tiene una superficie de 231.48 kilómetros cuadrados que lo ubica en el lugar 53 con respecto a los demás municipios del estado de Puebla (INEGI, 2009b).

### **Orografía**

El municipio pertenece casi en su totalidad, morfológicamente, al valle de Atlixco; la cota 1,500, al Suroeste marca el límite artificial con el valle de Matamoros. Por pertenecer a un valle que desciende de las laderas de la Sierra Nevada, el terreno marca un ligero declive de Norte a Sur de 1,700 metros sobre el nivel del mar a menos de 1,500. Al Este se identifica una zona montañosa que culmina en el cerro el Metate (INEGI, 2009b).

### **Hidrografía**

Por su configuración y ubicación geográfica, el municipio es bañado por varios ríos permanentes que lo cortan de Norte a Sur; todos ellos son ríos que descienden de la Sierra Nevada, destacando el Río Grande, Ahuehuello, Matadero, Atila y Nexapa (INEGI, 2009b).

### **Clima**

En el municipio pueden identificarse dos variantes de climas semicálidos y uno cálido, clima semicálido subhúmedo ((A)C(w<sub>1</sub>) y (A)C(w<sub>0</sub>)), se presenta en la mayor parte del municipio, excluyendo el Noreste y Suroeste, clima cálido subhúmedo

(Aw<sub>0</sub>), temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Una pequeña parte presenta un clima templado, subhúmedo (Cw<sub>1</sub>), temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual como se observa en la Figura 5 (INEGI, 2009b, García, 1998).

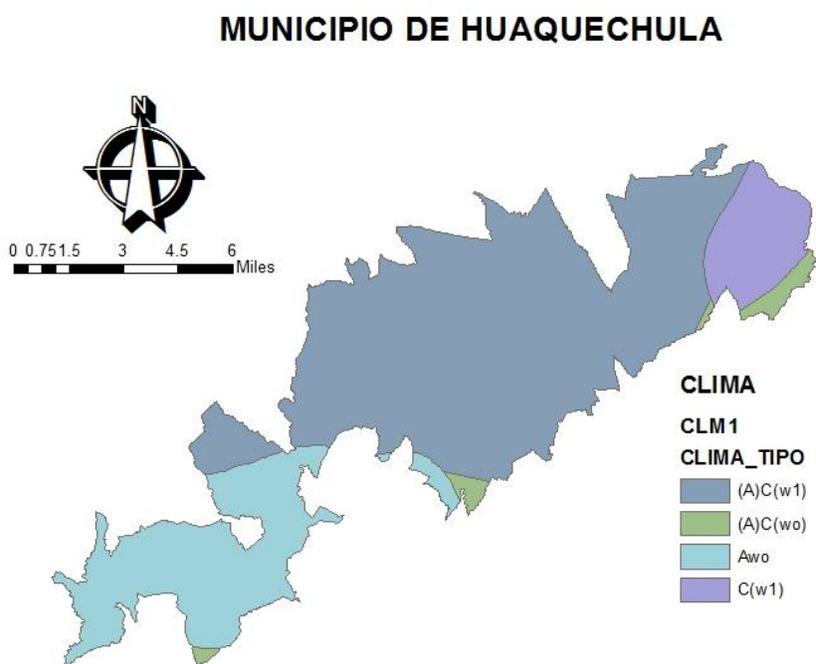


Figura 5. Climas del municipio del municipio de Huaquechula

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

## Edafología

El municipio muestra una gran variedad de suelos como se observa en la Figura 6:

Rendzina: Se localiza en un área considerable al Este.

Feozem: Se encuentra en cuatro áreas, al Noreste, centro extremo Sureste, y Centro-Sur.

Litosol: Se caracterizan por su profundidad menor de 10 centímetros, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión es muy variable dependiendo de otros factores ambientales. Se presenta en pequeñas áreas dispersas por todo el municipio. Algunas áreas presentan suelos de tipo cambisol, fluvisol y vertisol (INEGI, 2009b).

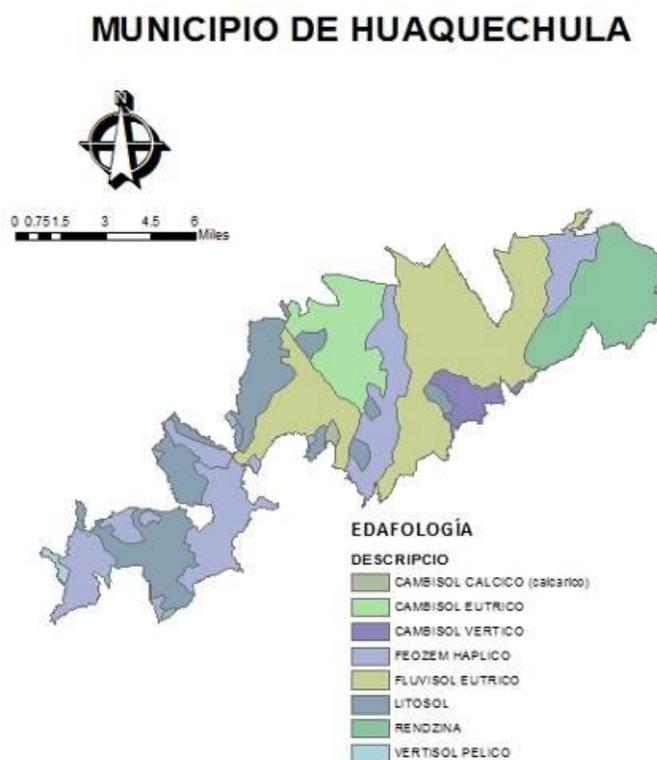


Figura 6. Edafología del municipio de Huaquechula

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

### Uso de suelo y vegetación

El municipio presenta una gran diversidad en cuanto a la vegetación y el uso del suelo, íntimamente relacionado con la diversidad edafológica. Se pueden identificar áreas dispersas de selva baja caducifolia, relacionada con vegetación secundaria

arbustiva, así como un área considerable de palmares al Noroeste, áreas de matorrales encinosos al Oeste, y áreas aisladas al Noroeste, se observan áreas reducidas con pastizal inducido y en mayor proporción, un área de 10,237 ha dedicada al manejo agrícola y pecuario (INEGI, 2009b), como se observa en la Figura 7.



Figura 7. Uso de suelo en el municipio de Huaquechula

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

## Población

La población ha sufrido un decremento del 0.2%, en 2005 contaba con 25,425 habitantes, para 2010 INEGI reportó una población de 25,373 habitantes (Cuadro 2), este decremento se debe a que el municipio presenta un alto grado de migración (SEDESOL, 2013).

**Cuadro 2. Población del municipio de Huaquechula**

	<b>Año</b>	<b>Año</b>
	<b>2005</b>	<b>2010</b>
Hombres	11,694	11,681
Mujeres	13,731	13,692
<b>Total</b>	<b>25,425</b>	<b>25,373</b>

Fuente: SEDESOL 2013

### CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se discuten los distintos enfoques teóricos relacionados con la gestión del agua, en específico el saneamiento fundamental en aguas que se han modificado por diversos factores, principalmente por el manejo antropogénico. Se busca exponer los elementos conceptuales que ayuden a explicar el problema de investigación planteado para el caso de la Planta Tratadora de Aguas Residuales de Atlixco, Puebla, que genera aguas tratadas que son utilizadas para la producción de alimentos agrícolas.

El deterioro de los recursos naturales, visualiza una necesidad de cambio de paradigma en la gestión de los mismos. En las últimas cinco décadas se ha realizado una transición desde un enfoque tradicional intersectorial a un enfoque holístico y orientado hacia la sustentabilidad. En lo referente al recurso agua y su saneamiento se ha discutido en diversos eventos la importancia de éstos. En el Cuadro 3 se resumen los más relevantes en esta materia, desde la visión de la Organización de las Naciones Unidas (2010).

Cuadro 3. El derecho humano al agua y al saneamiento. Hitos

<b>Hito</b>	<b>Año</b>	<b>Acuerdo relacionado al agua y saneamiento</b>
Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua	Marzo 1977 Mar de Plata	Reconoció por vez primera el agua como un derecho humano y declaraba que “Todos los pueblos, cualquiera que sea su nivel de desarrollo o condiciones económicas y sociales, tienen derecho al acceso a agua potable en cantidad y calidad acordes con sus necesidades básicas”.
Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer	Diciembre 1979 CEDAW	“Los Estados Parte adoptarán todas las medidas apropiadas para eliminar la discriminación contra la mujer en las zonas rurales a fin de asegurar, en condiciones de igualdad entre hombres y mujeres, su participación en el desarrollo rural y en sus beneficios, y en particular, le asegurarán el derecho a: ... (h) Gozar de condiciones de vida adecuadas, particularmente en las esferas de la vivienda, los servicios de saneamiento, la electricidad y el abastecimiento de agua, los transportes y las comunicaciones”
Convención sobre los	Noviembre	La Convención menciona explícitamente el agua,

Derechos del Niño	1989	<p>el saneamiento ambiental y la higiene en su artículo 24(2), que estipula que: “Los Estados Parte asegurarán la plena aplicación de este derecho y, en particular, adoptarán las medidas apropiadas para: (...)</p> <p>c) Combatir las enfermedades y la malnutrición en el marco de la atención primaria de la salud mediante, entre otras cosas, la aplicación de la tecnología disponible y el suministro de alimentos nutritivos adecuados y agua potable salubre, teniendo en cuenta los peligros y riesgos de contaminación del medio ambiente; (...)</p> <p>e) Asegurar que todos los sectores de la sociedad, y en particular los padres y los niños, conozcan los principios básicos de la salud y la nutrición de los niños, las ventajas de la lactancia materna, la higiene y el saneamiento ambiental y las medidas de prevención de accidentes; tengan acceso a la educación pertinente y reciban apoyo en la aplicación de esos conocimientos”.</p>
Conferencia Internacional sobre Agua y Desarrollo Sostenible	Enero 1992 Dublín	El Principio 4 de la Conferencia de Dublín establece que “...es esencial reconocer ante todo el derecho fundamental de todo ser humano a tener acceso a un agua pura y al saneamiento por un precio asequible”.
Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo	Junio 1992 Cumbre de Río	El capítulo 18 del Programa 21 refrendó la Resolución de la Conferencia de Mar del Plata sobre el Agua por la que se reconocía que todas las personas tienen derecho al acceso al agua potable, lo que se dio en llamar “la premisa convenida”.
Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre la Población y el Desarrollo	Septiembre 1994	El Programa de Acción de la Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre la Población y el Desarrollo afirma que toda persona “tiene derecho a un nivel de vida adecuado para sí y su familia, incluidos alimentación, vestido, vivienda, agua y saneamiento”
Resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas A/Res/54/175 “El Derecho al Desarrollo”	Diciembre 1999	El artículo 12 de la Resolución afirma que “en la total realización del derecho al desarrollo, entre otros: (a) El derecho a la alimentación y a un agua pura son derechos humanos fundamentales y su promoción constituye un imperativo moral tanto para los gobiernos nacionales como para la comunidad internacional”.
Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible	Septiembre 2002	La Declaración Política de la Cumbre indica “Nos felicitamos de que la Cumbre de Johannesburgo haya centrado la atención en la universalidad de la dignidad humana y estamos resueltos, no sólo mediante la adopción de decisiones sobre objetivos y calendarios sino también mediante asociaciones de colaboración, a aumentar rápidamente el acceso a los servicios básicos, como el suministro de agua potable, el saneamiento, una vivienda adecuada, la energía, la atención a la salud, la seguridad alimentaria y la

		protección de la biodiversidad”.
Observación General nº 15. El derecho al agua	Noviembre 2002	La Observación General 15 interpreta el Pacto sobre Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966 reafirmando el derecho al agua en la legislación internacional. Esta Observación proporciona algunas orientaciones para la interpretación del derecho al agua, enmarcándolo en dos artículos: el artículo 11, que reconoce el derecho a un nivel de vida adecuado, y el artículo 12, que reconoce el derecho a disfrutar del más alto nivel de salud posible. La Observación establece de forma clara las obligaciones de los Estados Parte en materia de derecho humano al agua y define qué acciones podrían ser consideradas como una violación del mismo. El artículo 1.1 estipula que “... El derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos”.
Proyecto de directrices para la realización del derecho al agua potable y al saneamiento. E/CN.4/Sub.2/2005/25	Julio 2005	Este proyecto de directrices, incluido en el informe del Relator Especial para el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas, El Hadji Guissé, y solicitado por la Subcomisión de Promoción y Protección de los Derechos Humanos, pretende asistir a los responsables de la elaboración de políticas a nivel de los gobiernos y las agencias internacionales y los miembros de la sociedad civil que trabajan en el sector del agua y el saneamiento a que hagan realidad el derecho al agua potable y al saneamiento. Estas directrices no pretenden dar una definición jurídica del derecho al agua y al saneamiento sino proporcionar orientación para su ejecución.
Consejo de Derechos Humanos, Decisión 2/104	Noviembre 2006	El Consejo de Derechos Humanos “solicita a la Oficina del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos que, teniendo en cuenta las opiniones de los Estados y otros interesados, efectúe, dentro de los límites de los recursos existentes, un estudio detallado sobre el alcance y el contenido de las obligaciones pertinentes en materia de derechos humanos relacionadas con el acceso equitativo al agua potable y el saneamiento, que imponen los instrumentos internacionales de derechos humanos, que incluya conclusiones y recomendaciones pertinentes al respecto, para su presentación al Consejo antes de su sexto período de sesiones”.
Convención sobre los derechos de las personas con discapacidad	Diciembre 2006	El artículo 28 define el derecho de las personas con discapacidad a un nivel de vida adecuado para ellas y sus familias y 28(2) “los Estados Parte reconocen el derecho de las personas con discapacidad a la protección social y a gozar de ese derecho sin discriminación por motivos de discapacidad, y adoptarán las medidas pertinentes para proteger y promover el ejercicio de este

		derecho, entre ellas: (a) Asegurar el acceso en condiciones de igualdad de las personas con discapacidad a servicios de agua potable y su acceso a servicios, dispositivos y asistencia de otra índole adecuados a precios asequibles para atender las necesidades relacionadas con su discapacidad”.
Informe del Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Derechos Humanos sobre el alcance y los contenidos de las obligaciones pertinentes en materia de derechos humanos relacionados con el acceso equitativo al agua potable y el saneamiento que imponen los instrumentos internacionales de derechos humanos	Agosto 2007	Siguiendo la Decisión 2/104 del Consejo de Derechos Humanos, el informe del Alto Comisionado de Naciones Unidas para los Derechos Humanos establece que “Es ahora el momento de considerar el acceso al agua potable saludable y al saneamiento como un derecho humano, definido como el derecho a un acceso equitativo y no discriminatorio a una cantidad suficiente de agua potable saludable para el uso personal y doméstico... que garantice la conservación de la vida y la salud”.
Consejo de Derechos Humanos, Resolución 7/22	Marzo 2008	Mediante esta Resolución el Consejo de Derechos Humanos decide nombrar, por un período de 3 años, a un experto independiente sobre la cuestión de las obligaciones en materia de derechos humanos relacionadas con el acceso al agua potable y el saneamiento.
Consejo de Derechos Humanos, Resolución 12/8	Octubre 2009	En esta resolución, el Consejo de Derechos Humanos acoge con satisfacción la consulta con la experta independiente sobre la cuestión de las obligaciones en materia de derechos humanos relacionadas con el acceso al agua potable y al saneamiento, recibe el primer informe anual de la experta independiente y, por vez primera, reconoce que los Estados tienen la obligación de abordar y eliminar la discriminación en materia de acceso al saneamiento, instándolos a tratar de forma efectiva las desigualdades a este respecto.
Asamblea General de las Naciones Unidas, Resolución A/RES/64/292	Julio 2010	Por vez primera, esta resolución de las Naciones Unidas reconoce oficialmente el derecho humano al agua y al saneamiento y asume que el agua potable pura y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. La Resolución insta a los Estados y a la organizaciones internacionales a proporcionar recursos financieros, a apoyar la capacitación y la transferencia de tecnología para ayudar a los países, en particular a los países en vías de desarrollo, a suministrar unos servicios de agua potable y saneamiento seguros, limpios, accesibles y asequibles para todos.
Consejo de Derechos Humanos, Resolución A/HRC/RES/15/9	Septiembre 2010	Siguiendo la resolución de la Asamblea General de las Naciones Unidas, esta resolución del Consejo de Derechos Humanos de la ONU afirma que el derecho al agua y al

		saneamiento es parte de la actual ley internacional y confirma que este derecho es legalmente vinculante para los Estados. También exhorta a los Estados a desarrollar herramientas y mecanismos apropiados para alcanzar progresivamente el completo cumplimiento de las obligaciones relacionadas con el acceso seguro al agua potable y al saneamiento, incluidas aquellas zonas actualmente sin servicio o con un servicio insuficiente.
Consejo de Derechos Humanos, Resolución A/HRC/RES/16/2	Abril 2011	En esta resolución, el Consejo de Derechos humanos decide “prorrogar el mandato de la actual titular de mandato como Relatora Especial sobre el derecho humano al agua potable y el saneamiento por un período de tres años” y “Alienta al/a la Relator/a Especial a que, en el desempeño de su mandato... Promueva la plena realización del derecho humano al agua potable y el saneamiento, entre otros medios, siguiendo prestando especial atención a las soluciones prácticas en relación con el ejercicio de dicho derecho, particularmente en el contexto de las misiones a los países, y siguiendo los criterios de disponibilidad, calidad, accesibilidad física, asequibilidad y aceptabilidad”.

Fuente: Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio (UNW-DPAC), 2010

Es a partir de estos hitos que surgen algunos enfoques que enfatizan la gestión de los recursos hídricos de manera integral, entre los cuales se encuentran: la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH), el enfoque ecosistémico (EE) y para la generación de indicadores el modelo presión estado respuesta (PER). A continuación se analizan las corrientes teóricas que los originan.

### 3.1 La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH)

El término Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) es un término que ha estado presente desde los años 30's, a finales de los 50's las Naciones Unidas comenzaron a promoverlo y es hasta los 90's que el término es redescubierto por la Asociación Mundial para el Agua, quien lo adopta como un nuevo paradigma, que engloba diversos actores y se define como *“un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de*

*maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales” (GWP, 2012).*

También se considera como un proceso permanente de coordinación entre entidades públicas y privadas, orientado a entregar una visión de conjunto de las acciones que ellas realizan, de acuerdo con el marco jurídico, económico e institucional vigente, con el propósito de abordar y solucionar situaciones características de la interacción de la sociedad con los recursos hídricos en una cuenca o grupo de cuencas, en que las acciones independientes o parciales, no ofrecen una adecuada respuesta y solución (Restrepo, 2004).

La GIRH supone cambiar los enfoques tradicionales con base en el subsector (agua y saneamiento, riego, industria, etc.), por el enfoque más holístico o integrado de la gestión del agua, basado en un juego de principios clave acordados. En conjunto, los principios ofrecen un marco para analizar y, ulteriormente, para manejar los múltiples usos del agua en situaciones de más competencia y de conflicto potencial, y donde los recursos hídricos son escasos (o están contaminados). Con frecuencia, estos conflictos reales o potenciales amenazan la seguridad del abastecimiento de agua y saneamiento (Moriarty *et al.*, 2006).

La gestión del recurso hídrico incorpora los factores de conservación, preservación y restauración, así como la participación ciudadana, socialmente se enlista en los principios de equidad e igualdad al momento del acceso y distribución del recurso hídrico, da prioridad a la participación ciudadana en el manejo del recurso, finalmente en términos económicos se fundamenta en la eficiencia, reconoce el valor intrínseco del agua como recurso natural y su valor ambiental (Peña, SF).

La GIRH es un proceso de asignación de funciones a los sistemas de agua, de establecer normas, cumplir con la ley (mantener el orden) y de gestión. Incluye la recolección de información, el análisis de los procesos físicos y socioeconómicos, y

considerar los intereses y tomas de decisión relacionados con la disponibilidad, desarrollo y uso de los recursos hídricos (Hofwegen y Jasper, 2000). La GIRH implica la planificación y gestión coordinadas de la tierra, el agua y otros recursos medio ambientales, para su uso equitativo, eficaz y sostenible (Calder, 1999).

La GIRH expresa la idea de que los recursos hídricos deben manejarse de forma holística, coordinando e integrando todos los aspectos y las funciones de extracción y control del agua, y de los servicios de suministro relacionados con el agua, para que reporten beneficios sostenibles y equitativos a todos los que dependen del recurso (CE, 1998)

Un concepto clave es el concepto de *proceso*. La GIRH es el proceso para llegar de un estado existente a un estado futuro hipotético y preferido, mediante el logro común de los principios acordados o de mejores prácticas de gestión del agua, y con la participación de todos los grupos de interés pertinentes (Moriarty *et al.*, 2006).

La gestión del agua es uno de los principales factores para orientar nuevos rumbos hacia escenarios sustentables. Constituye una importante palanca en el tránsito de la humanidad hacia un desarrollo sustentable, su importancia en el marco de la evaluación de los recursos naturales se deriva en ser un elemento que desempeña un rol vital en el funcionamiento del conjunto de los ecosistemas terrestres; constituye un elemento económico, social, y político que no reconoce las fronteras de los estados nación. Es un bien común mundial, el bien público por excelencia, lo que implica que cada persona, comunidad, o nación tiene derechos indiscutibles en relación al acceso, en calidad y cantidad necesaria de acuerdo a su escenario de organización social y ambiental (Achkar, 2002).

Hace más de dos décadas (en la Conferencia Internacional sobre Agua y el Medio ambiente, celebrada en Dublín, Irlanda, 1992), surgieron cuatro principios básicos del agua que se han convertido en los fundamentos de la GIRH.

*“Principio 1: El agua dulce es un recurso limitado y vulnerable, esencial para la vida, el desarrollo y el medio ambiente”.*

Este principio resalta el hecho de que el agua es un elemento crítico para la vida. Sin embargo, el agua dulce es un recurso limitado ya que el ciclo hidrológico en promedio rinde una cantidad fija de agua por período, y las medidas humanas no pueden ajustar significativamente la cantidad de recursos hídricos. Asimismo, como recurso, el agua es paradójicamente esencial para el desarrollo y al mismo tiempo vulnerable a sus efectos. La gestión efectiva de recursos hídricos, que intenta asegurar que los servicios que se encuentran en demanda puedan ser provistos y sostenidos con el tiempo, requiere un enfoque integral que vincule al desarrollo social y económico con la protección de los ecosistemas naturales. La gestión efectiva no produce una dicotomía entre los usos de la tierra y del agua, pero ve la integración de dichos usos a través de la zona de captación completa de una cuenca hidrográfica. El enfoque integrado hacia la gestión de los recursos hídricos requiere la coordinación del rango de actividades humanas que crean la demanda de agua, determinan los usos de la tierra y generan productos de desecho del agua. El principio 1 también reconoce a la zona de captación o a la cuenca hidrográfica como la unidad lógica para la gestión de los recursos hídricos.

*“Principio 2: El desarrollo y la gestión de los recursos hídricos deberían basarse en un enfoque participativo, que involucre a los usuarios, a los moderadores y a los políticos en todos los niveles”.*

Cuando el agua está involucrada, todas las personas son grupos de interés. Por consiguiente, el desarrollo y la gestión de los recursos hídricos deberían basarse en un enfoque participativo que se forme sobre el principio de la democratización de la toma de decisiones, y brinde reconocimiento al aporte de múltiples grupos de interés incluyendo usuarios, moderadores y políticos de todos los niveles. La participación real sólo tiene lugar cuando los grupos de interés forman parte del proceso de toma de decisiones. Esto puede ocurrir directamente cuando las

comunidades locales se reúnen para tomar decisiones acerca del suministro, la gestión y los usos de los recursos hídricos. La participación también tiene lugar si se eligen de forma democrática o de otra forma agencias o portavoces que representen a los grupos de interés; pero hasta en dicha situación, el acceso a la información, los procesos consultivos y las oportunidades de participación deberían también existir.

*“Principio 3: Las mujeres tienen un papel central en la provisión, gestión y cuidado de los recursos hídricos”.*

Es ampliamente reconocido el hecho de que las mujeres desempeñan un papel clave en la recolección y protección de agua para uso doméstico y, en muchos países, para el uso agrícola. Sin embargo, las mujeres contribuyen materialmente en menor medida que los hombres en áreas clave tales como la gestión, el análisis de problemas y los procesos de toma de decisiones relacionados con los recursos hídricos. En general, las raíces del rol marginado de la mujer en la gestión de recursos hídricos pueden rastrearse hasta tradiciones sociales y culturales, las que también varían entre las distintas sociedades.

*“Principio 4: El agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debería ser reconocida como un bien económico y como un bien social”.*

Muchos de los antiguos errores en la GIRH pueden atribuirse a la falta de reconocimiento del verdadero valor del agua. Si la percepción errónea del valor del agua persiste, entonces no podrá obtenerse el máximo beneficio de los recursos hídricos.

### **3.2 Enfoque Ecosistémico (EE)**

Frente a los desafíos que plantean tanto los Objetivos de Desarrollo del Milenio como la Evaluación de Ecosistemas del Milenio, el enfoque ecosistémico se presenta

como una oportuna estrategia para mantener los servicios ecosistémicos mediante la conservación de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas dentro de procesos que apuntan a establecer balances y sinergias entre las variables sociales, económicas y ambientales (Smith y Maltby, 2003).

Si bien asume como eje al ecosistema, este enfoque tiene la enorme virtud de articular de forma armónica las tres dimensiones del desarrollo sostenible: medio ambiente, sociedad humana y economía. Aquí el ecosistema es entendido en una perspectiva amplia vinculada al desarrollo humano, es decir como un sistema natural cuyos flujos energéticos e interacciones con el ser humano son determinantes en términos tanto de su conservación como de la calidad de vida de la gente. El ecosistema es fuente de beneficios (representados en servicios ecosistémicos) a los cuales la gente debe acceder de manera justa y equitativa. En consecuencia, su manejo debe ser integral y orientado a romper con la disyuntiva de conservación o uso. El Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define al enfoque ecosistémico como “una estrategia para la gestión integrada de los recursos de tierras, hídricos y vivos que promueve la conservación y la utilización sostenible en forma equitativa” (PNUMA & CBD, 2000; PNUMA & CBD, 2004).

Importantes instancias internacionales como el CDB y la Convención de Ramsar han apropiado el enfoque ecosistémico, es muy importante que este proceso se adapte a cada contexto en función de las realidades regionales, nacionales y locales. No se debe olvidar que ante todo ésta es una herramienta útil para integrar las diferentes dimensiones del desarrollo (ambiental, social y económico) alrededor de la gestión de ecosistemas.

El enfoque ecosistémico complementa la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH). Ambos son conceptos holísticos que se han desarrollado en las últimas décadas, el primero enfocado en la gestión ecosistémica y el segundo en la gestión del agua, tienen el desafío de ser verdaderamente integrales y no quedarse en sus propios sectores de origen, recursos hídricos y medio ambiente respectivamente. En

la práctica existe una estrecha relación entre la hidrología y los servicios ecosistémicos como la regulación, la recreación, el transporte y el suministro del agua. De la misma manera existe una estrecha interacción entre la estructura y función de una cuenca hidrográfica con la estructura y función de los ecosistemas asociados a dicha cuenca. Más aún, los procesos sociales y económicos en una cuenca tienen como referente natural los servicios de provisión, regulación y culturales que prestan los ecosistemas y las cuencas hidrográficas. En consecuencia, si bien la cuenca y el ecosistema son categorías y escalas teóricamente distintas, en el mundo real una gestión del agua ambiental, social y económicamente eficiente debe realizarse integrando ambas aproximaciones. En este sentido, el enfoque ecosistémico no pretende reemplazar sino complementar y, si es posible, potenciar los convencionales modelos de manejo de las cuencas hidrográficas (Kosten y Guerrero, 2005).

Los principios del enfoque ecosistémico son:

1. La elección de los objetivos de la gestión de los recursos de tierras, hídricos y vivos debe quedar en manos de la sociedad.
2. La gestión debe estar descentralizada al nivel apropiado más bajo.
3. Los administradores de ecosistemas deben tener en cuenta los efectos (reales o potenciales) de sus actividades en los ecosistemas adyacentes y en otros ecosistemas.
4. Dados los posibles beneficios derivados de su gestión, es necesario comprender y gestionar los ecosistemas en un contexto económico. Este tipo de programa de gestión debe ayudar a:
  - (a) Disminuir las distorsiones del mercado que repercuten negativamente en la diversidad biológica;
  - (b) Orientar los incentivos para promover la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica;
  - (c) Procurar, en la medida de lo posible, incorporar los costos y los beneficios en el ecosistema de que se trate.

5. Con el fin de mantener los servicios ecosistémicos, la conservación de la estructura y la función de los ecosistemas debe ser un objetivo prioritario.
6. Los ecosistemas se deben gestionar dentro de los límites de su funcionamiento.
7. El enfoque ecosistémico debe aplicarse a las escalas espaciales y temporales apropiadas.
8. Habida cuenta de las diversas escalas temporales y los efectos retardados que caracterizan a los procesos de los ecosistemas, se deben establecer objetivos a largo plazo en la gestión de los ecosistemas.
9. Debe reconocerse que el cambio es inevitable.
10. Se debe procurar el equilibrio apropiado entre la conservación y la utilización de la diversidad biológica, y su integración.
11. Deben tenerse en cuenta todas las formas de información pertinente, incluidos los conocimientos, las innovaciones y las prácticas de las comunidades científicas, indígenas y locales.
12. Deben intervenir todos los sectores de la sociedad y las disciplinas científicas pertinentes.

La UICN, a través de su Comisión de Manejo de Ecosistemas, ha sugerido cinco pasos para la implementación del enfoque ecosistémico en la planeación de acciones, proyectos e iniciativas en el campo (Shepherd, 2004):

Paso A: Determinación de los principales actores, definición del área del ecosistema, y desarrollo de las relaciones entre ellos.

Paso B: Caracterización de la estructura y función del ecosistema y elaboración de mecanismos para su manejo y monitoreo.

Paso C: Identificación de elementos económicos importantes que afectarán al ecosistema y sus habitantes. Paso D: Determinación de impactos probables sobre ecosistemas adyacentes.

Paso E: Toma de decisiones sobre objetivos de largo plazo, así como sobre maneras

### **3.3 Modelo Presión-Estado-Respuesta (PER)**

El modelo PER surge a finales de los 80's, y es adoptado y difundido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD). Este modelo se basa en que las actividades humanas ejercen de una manera directa e indirecta (presiones) sobre el ambiente, afectando su calidad y cantidad de recursos naturales (estado). Este modelo tuvo varios cambios durante la última década, debido a las limitantes que se detectaron en su lógica de razonamiento, que corresponde de manera efectiva a las condiciones de incertidumbre, funcionamiento sistemático, perspectiva holística, ecosistémica, propia de un modelamiento ambiental, en el que coexisten las tres dimensiones consideradas para el desarrollo sostenible (económico, social y ambiental). Desde una perspectiva sistémica, la complejidad implícita en el funcionamiento jerárquico debe reconocer no sólo las variables que hacen parte de cada nivel jerárquico sino también, las interrelaciones que se originan de su funcionalidad. Solo así se puede reducir el nivel de incertidumbre propio del sistema ambiental, social y económico, en su conjunto (Pino, 2001).

Dependiendo del objetivo para el cual el modelo PER es utilizado, puede ser ajustado de acuerdo con las necesidades de una mayor precisión o con características particulares. Entre los ejemplos, está el modelo fuerza motriz estado respuesta, utilizado por la Comisión de Desarrollo Sustentable (CDS) de las Naciones Unidas, cuyos trabajos se basan principalmente en indicadores de desarrollo sostenible; y por otro lado, el modelo fuerzas motrices presión estado impacto respuesta utilizado por la Agencia Europea para el Ambiente (OECD, 1993; OECD, 2003).

Algunas de las características de los indicadores que utilizan en el modelo PER son:

a). Indicadores de presión:

Se entiende como “presión” aquellas presiones subyacentes o indirectas (o sea una actividad propiamente dicha o las tendencias importantes desde un punto de vista ambiental), así como las presiones inmediatas o directas (utilización de recursos y emanaciones de polución y residuos).

Están estrechamente asociados a métodos de producción y de consumo; reflejan frecuentemente intensidades de emisión o de utilización de recursos y sus tendencias y evoluciones, dentro de un determinado período. Pueden también servir para evidenciar los progresos realizados intentando disociar las actividades económicas de las presiones ambientales correspondientes. Pueden igualmente ser utilizados para evaluar el grado de ejecución de objetivos nacionales y de lineamientos internacionales.

b). Indicadores de Estado:

Hacen referencia a los indicadores de calidad y cantidad de recursos naturales y del ambiente. Reflejan los objetivos finales de una política ambiental y tratan de mostrar en forma general el estado del ambiente y su evolución en el tiempo.

En esta categoría entran las concentraciones de contaminaciones de diferentes medios, exceso de cargas críticas, exposición de la población a ciertos niveles de contaminación, estado de la fauna y flora y de las reservas de recursos naturales, entre otros.

En la práctica, las mediciones de las condiciones ambientales pueden tornarse difíciles o innecesarias, por eso, las presiones sobre el ambiente son frecuentemente empleadas como sustituto.

c). Indicadores de respuesta

Muestran el grado de respuesta de la sociedad a cuestiones ambientales. Estas comprometen acciones y reacciones individuales y colectivas para:

- 1) atenuar o evitar los efectos negativos de actividades humanas sobre el medio ambiente;
- 2) imponer un límite de las degradaciones ya infringidas al ambiente y remediarlas; y
- 3) conservar y proteger los recursos naturales y el medio ambiente.

Dentro de esta categoría entran los recursos económicos gastados en la protección del ambiente; los impuestos y subvenciones relacionados con él; los sectores de mercado representativos de bienes y servicios del ambiente; las tasas de reducción de poluciones y reciclaje de residuos.

Cada apartado de la fórmula genérica PER puede ser ampliado en su contenido, añadiéndole mayor especificidad al tema. Ejemplo de ello son los modelos que se describen más adelante.

Como desventajas se puede decir que, debido a su lógica causal y lineal (vectorial), no es posible establecer relaciones entre distintos indicadores; cada uno es válido por si sólo y como tal debe ser abordado (Polanco, 2006).

### **3.4 Principales teorías de gestión de los recursos**

#### **3.4.1 Gestión orientada al Estado**

Este modelo de gestión tiene como fundamento que el Estado, a través de sus instituciones políticas y administrativas, debe y puede planear y asignar los escasos recursos de agua en el interés del bien común. Del mismo modo, el modelo se sostiene en una fuerte convicción, casi ideológica, de que el agua, los humanos y los

grupos sociales pueden ser planeados y gestionados por expertos de forma que se generen soluciones óptimas (Barrow, 1998).

Desde 1960 la planificación de cuencas de ríos ha sido aplicada en numerosos países africanos. Mientras que es popular en muchos países, sobre todo del Hemisferio Norte, los resultados de los proyectos a gran escala en África han sido frecuentemente bastante decepcionantes. Esto suele atribuirse a una serie de aspectos ligados al diseño y la implementación práctica. Es fácil pensar que el uso sistemático de las cuencas de río, traspasando fuertes fronteras sociales existentes (como grupos étnicos) y fronteras políticas y administrativas, mediante una base territorial para la planificación y acción medioambiental, puede conllevar importantes controversias políticas y prácticas. Incluso, debemos reconocer que el uso sistemático de fronteras ecológicas como unidades de planificación es una idea moderna con escasa precedencia histórica y lo que ha sido calificado como “la regla de la línea divisoria del agua” podría entrar en conflicto con los derechos democráticos básicos (Barrow, 1998).

Más allá se encuentra la noción de que la participación y muchos aspectos democráticos de la gestión del agua pueden ser garantizados adecuadamente a través de la participación de las partes interesadas en las instituciones de las cuencas de río a varios niveles. Tal participación puede discurrir desde un momentáneo interés hasta serios intentos de iniciar una cooperación real. No obstante, este enfoque tecnocrático cae dentro de lo calificado como el clásico enfoque estático de arriba hacia abajo en el desarrollo rural y en la gestión medioambiental, enfoque de desarrollo desafiado en los noventa por los paradigmas de desarrollo neoliberales y populistas (Westler, 2003).

### **3.4.2 Gestión orientada al Mercado**

El modelo basado en el mercado representa asimismo una crítica a los principios del modelo tecnocrático descrito arriba. Esta crítica se relaciona primordialmente con

cuestiones sobre cómo y por quién, debería ser tomada las decisiones sobre la asignación de recursos. El enfoque de gestión del agua basado en el mercado engloba muchos de los temas más controvertidos ya que el enfoque sostiene el argumento de que “el agua tiene un valor económico en todos sus usos competentes y debería ser reconocida como un bien económico” como fue declarado en el cuarto principio de la Declaración de Dublín Sobre Agua y Desarrollo Sostenible (UN, 1992).

Tres de las principales motivaciones para cobrar por el agua son:

1. puede ser usada para recuperar el costo de suministro del servicio;
2. puede suponer un incentivo para el uso eficiente de recursos escasos de agua y
3. las tasas de agua pueden ser usadas como beneficio para otros en la sociedad (Westler, 2003).

El modelo de gestión orientado hacia el mercado se sustenta en el argumento neoliberal de que aunque los mercados puedan no ser perfectos, son sin duda mejores que burócratas y políticos a la hora de asignar recursos escasos. Respecto al sector del agua, el Banco Mundial declara: “Como con cualquier cosa en la gestión del agua, la elección no es entre primer y segundo óptimo si no entre “imperfecto” e “incluso más imperfecto”. Ha sido defendido que el agua puede y debe tratarse junto con otros recursos naturales como el petróleo y por lo tanto debe ser comercializada de algún modo. Por ejemplo estableciendo derechos claros de propiedad de comercialización, un mercado para el agua puede ser establecido. En este modelo la gestión del agua trata básicamente sobre el desarrollo de un marco legal y el establecimiento de mercados funcionales de agua basados en, por ejemplo, derechos de agua comerciables (Dinar *et al.*, 1997).

En este modelo, apenas queda espacio para que las autoridades de las cuencas de río puedan establecer prioridades o planear estratégicamente. El papel del Estado subyace en facilitar y revisar que el mercado funcione, lo cual puede ser suficientemente desafiante en ocasiones. Esta visión del agua como bien susceptible de ser comercializado en un mercado también ha sido criticada por basarse en un

enfoque reduccionista de lo que en realidad es un recurso multifacético y por ignorar los fuertes elementos y valores culturales y simbólicos asociados al agua. Otros autores (Gleick, 1998; Metha, 2000; Petrella, 2001) han discutido en contra de ofrecer a los inversores privados control sobre su “oro azul” y han clamado que el acceso al agua debería ser visto como un derecho humano, más en línea con las recomendaciones de las líneas prioritarias de la Conferencia de Mar del Plata de 1977.

### **3.4.3 Gestión orientada a la Comunidad**

El estático enfoque tecnocrático de la gestión del agua no solo ha sido retado por el modelo centrado en el mercado, sino que también ha recibido crecientes críticas por las ideas populistas que llevan ganando terreno en el discurso general de desarrollo desde los años ochenta, cuando emergieron nuevos argumentos sobre la necesidad de una participación creciente de la comunidad en el desarrollo, así como en la gestión de recursos naturales y surgieron críticas sobre la práctica de “profesionalismo normal” (tendencia conservadora que se refiere al pensamiento y los valores, métodos y comportamientos dominantes en una profesión). Desde entonces la “gestión de recursos basada en la comunidad” forma parte del vocabulario de la ayuda internacional al desarrollo. La idea de que las comunidades locales pueden gestionar recursos naturales, como el agua, de una forma sostenible se corresponde con el segundo principio de la Declaración de Dublín que indica que “El desarrollo y la gestión del agua debería bastarse en un enfoque de participación, involucrando usuarios, planificadores y diseñadores de políticas, a todos los niveles” (Dinar *et al.*, 1997; UN, 1992).

En los últimos años, los conceptos de la gestión basada en la comunidad han sido promovidos con gran entusiasmo en muchos documentos de políticas de agua. No obstante, se ha señalado que dichos modelos se prestan a nociones idealistas y simplistas de la comunidad. Las calificadas como “construcciones imaginativas de instituciones locales, de comunidades o indígenas”, tienden a subestimar las

particularidades políticas, históricas y ecológicas de las comunidades y sus instituciones. De hecho, en muchos de los documentos que defienden este enfoque, la idea de comunidad subyace en la cuestionable concepción de que las comunidades son socialmente homogéneas y toda su gente comparte normas y valores. Sin embargo, las comunidades pueden llegar a conflictos y puede haber sociedades realmente injustas, no necesariamente adecuadas para la gestión de recursos naturales (Dinar *et al.*, 1997). En el Cuadro 4 se hace una síntesis de los tres modelos explicados.

Cuadro 4. Modelos de gestión del agua

Tres modelos de gestión del agua			
Temas	Gestión Comunidad	Gestión Estado	Gestión Mercado
<b>Agente principal</b>	Comunidad, sociedad civil, asociaciones de usuarios de agua	Estado (ejecutivo), planificador, funcionario experto	Mercado, judicial.
<b>“Propiedad” del agua</b>	Común con varios sistemas de derechos de uso	Propiedad del estado	Propiedad individual, empresas privadas.
<b>Mecanismo de asignación de agua</b>	Acceso al agua mediante participación/inversión en el proyecto, herencia o usufructo	Acceso al agua a través de la asignación burocrática de licencias de agua sujeto de tarifas	Acceso al agua a través de la compra de derechos en un mercado
<b>Movilización de recursos</b>	Trabajo y otras contribuciones de los grupos locales de usuarios	Impuestos/tarifas de agua del Gobierno	Tarifas de agua e inversiones privadas
<b>Formas de resolución de conflictos</b>	Sociedad civil: comités, escuchas, reuniones generales, los mayores del poblado	Ejecutivo: junta directiva en representación de los “accionistas”. Decisiones de expertos	Mercado/judicial: mercado, leyes judiciales
<b>Enfoque de escala/regional</b>	Poblado local, comunidad, cuenca	Cuenca del Río	Usuario individual
<b>Perspectiva profesional dominante</b>	Profesionales de ONGs, granjeros	Hidrólogos/as, ingenieros, (economistas)	Economistas

Fuente: (Lein y Tagseth, 2009)

### 3.5 Características del agua desde la perspectiva del Estado

El agua tiene una serie de características especiales que le proporcionan un carácter diferente y excepcional respecto a la mayoría de los demás recursos

naturales. Entre esas características se destacan las siguientes (Young 1986, Rogers 1993):

**Movilidad e incertidumbre:** El agua está en constante movimiento, formando un ciclo indivisible conocido como el ciclo hidrológico, que confiere limitadas oportunidades para su control por parte del ser humano y que se manifiesta en forma errática, incierta e irregular en el tiempo y en el espacio. Este ciclo no respeta los límites políticos administrativos o de propiedad privada. La movilidad y la incertidumbre dificultan el establecimiento, a definición y la aplicación de los derechos de propiedad.

**Economías a escala:** El uso del agua se caracteriza por significativas economías de escala, especialmente en su almacenamiento, transporte y distribución. Se dan las condiciones de un monopolio natural clásico.

**Diversidad de usos:** El agua se caracteriza por una gran diversidad de formas de aprovechamiento. En la mayor parte de los tipos de aprovechamiento, normalmente consuntivos (como el riego, el abastecimiento de agua potable o uso industrial), los usuarios rivalizan en el uso del agua, por lo que la exclusión es posible y deseable. En otros tipos de aprovechamiento, normalmente no consuntivo o en el propio caudal (como la generación de energía hidroeléctrica, la pesca, el transporte fluvial o el esparcimiento), no necesariamente existe rivalidad entre los usuarios y la exclusión no siempre es posible, aunque si se da un alto grado de interrelación, interdependencia y afectación recíproca, especialmente en los usos consuntivos.

**Interdependencia general de los usuarios:** El ser humano interfiere en el ciclo hidrológico, normalmente captando el agua en un punto para su aprovechamiento y devolviéndola en un tiempo distinto y con una calidad alterada. En la abrumadora mayoría de los usos, solo una parte del agua inicialmente extraída de una corriente se consume. El agua que no se consume –es decir, que no se evapora o evapotranspira (el término “evapotranspiración” se refiere a la pérdida de agua

consumida y evaporada por una planta) –retorna a la corriente o al acuífero, y en consecuencia pueden aprovecharse aguas abajo, aunque con frecuencia a costa de una cierta pérdida de calidad. Como resultado, los usos y usuarios situados aguas abajo dependen de manera crítica de la cantidad, calidad y tiempo de los sobrantes, caudales de retorno o pérdidas de los usos y usuarios situados aguas arriba. Esta característica del agua provoca un alto pero muchas veces imprevisible (debido, en parte, a la multitud de causas y efectos, grandes retrasos entre ellos y las interferencias entre impactos antrópicos y naturales) grado de interrelaciones, interdependencia y afectación recíproca (externalidades o efectos externos) entre los usuarios.

**Naturaleza unidireccional, asimétrica y anisotrópica de las interrelaciones e interdependencias entre los usos y usuarios de agua en un sistema hídrico integrado:** Los efectos externos, tanto positivos como negativos, causados por las interrelaciones e interdependencias entre los múltiples usos y usuarios de agua siempre se propagan –a través de los sobrantes, caudales de retorno o pérdidas– desde los usos y usuarios situados aguas arriba hacia los usos y usuarios ubicados aguas abajo. En otras palabras, lo que ocurre aguas arriba casi siempre tiene algún efecto en los usos y usuarios de agua abajo, mientras que lo que ocurre aguas abajo difícilmente puede tener influencia en los usuarios situados aguas arriba.

Como resultado de ello, como regla general, a los usuarios aguas arriba, poco les interesa los efectos de sus acciones y decisiones en los usos y usuarios aguas abajo por lo que suelen aprovechar su ubicación privilegiada. Los usuarios aguas abajo, no tienen posibilidad de controlarlos sin una intervención reguladora externa. Este hecho limita severamente las posibilidades de alcanzar un aprovechamiento del recurso que sea económicamente óptimo, socialmente justo y ambientalmente sustentable solo a través de negociaciones o transacciones entre usuarios privados o su acción colectiva, por lo que se justifica la intervención regulatoria (o de gestión) del Estado.

Estas características de agua han dado como resultado que en la mayoría de los países, el agua es normalmente un bien del dominio público del Estado, sobre el cual se conceden derechos de uso a particulares (CEPAL, 1995). Estos derechos de uso están protegidos normalmente por las cláusulas constitucionales de la propiedad privada. Este es el elemento legal fundamental de los sistemas que han promovido con éxito la inversión privada en el desarrollo del potencial económico del recurso (Solanes & Getches, 1998).

Sin embargo, y siempre que no haya un despojo funcional del contenido económico del derecho, las maneras de su ejercicio pueden ser reguladas, con carácter general, en función de necesidades de sustentabilidad ecológica y social. Esta regulación no debe ser arbitraria, caprichosa, irracional, irrazonablemente discriminatoria o equivalente a la confiscación de la propiedad privada (Solanes 1998). Se ha estimado aceptable la regulación siempre y cuando la propiedad reporte una rentabilidad prudente y el propietario mantenga una variedad razonable de usos posibles, así como para impedir daños.

Como, en el caso del agua, se trata de un bien de dominio público, al Estado le corresponde el deber inalienable de su gestión; es decir, la regulación de su uso o aprovechamiento en función del interés público. Su ejercicio por parte del Estado se orienta hacia los objetivos de conservación y protección del recurso, acorde con la función ecológica del mismo; de equidad en el acceso, en relación con sus funciones sociales y culturales; y de eficiencia en su uso y prevención de su monopolización, como expresión de la función económica derivada (Segura, 1998). En otras palabras, la gestión del agua es un proceso que busca solucionar conflictos entre múltiples usuarios, tanto directos (quienes usan el agua para aprovechamientos sectoriales, como abastecimiento de agua potable y saneamiento, uso industrial, riego, generación hidroeléctrica, pesca y navegación) como indirectos (la sociedad en conjunto), quienes, queriéndolo o no, dependen de un recurso compartido (CEPAL, 1998).

Las funciones fundamentales o sustantivas de gestión del agua son (Jouravlev, 2003):

- i. La aplicación de la legislación respectiva
- ii. La asignación del agua; es decir, la definición y modificación de acceso al recurso, principalmente el otorgamiento de permisos, autorizaciones, concesiones, derechos u otros instrumentos de uso y aprovechamiento.
- iii. El control de la contaminación; es decir, la definición y modificación de condiciones de devolución del agua al ecosistema después de su uso o aprovechamiento, principalmente el establecimiento de límites máximos permisibles de descargas de aguas servidas y el otorgamiento de permisos o autorizaciones de descargas
- iv. La identificación, evaluación y monitoreo del recurso, tanto en cantidad como en calidad, y la determinación de recursos utilizables y caudales mínimos o ecológicos.
- v. El inventario, registro y catastro de usos y usuarios y la fiscalización de los aprovechamientos.
- vi. La elaboración de planes de recursos hídricos.
- vii. La evaluación de proyectos y aprobación de obras.
- viii. La determinación técnica de líneas de ribera y de áreas protegidas.
- ix. La adjudicación en instancia administrativa de conflictos vinculados al uso del agua.

Los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, también conocidos como organismos operadores, se encargan de administrar y operar los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento, con el objeto de dotar estos servicios a los habitantes de un municipio o de una entidad federativa. Dichos organismos pueden tener diferentes denominaciones, como: sistemas de agua, direcciones, comisiones, juntas locales, departamentos y comités, entre otros, de acuerdo a la estructura orgánica a la que pertenezcan.

El municipio puede ser definido, jurídicamente, como una persona de derecho público, constituido por una comunidad humana, asentada en un territorio determinado, que administra sus propios y particulares intereses, y que depende siempre, en mayor o menor grado, de una entidad pública o superior, el Estado nacional, en un Estado Unitario, o provincia o estadual, en un Estado Federal (Osorio, 1982). Sierra (1998) considera que los elementos principales que caracterizan a un municipio son:

- Alude a un espacio o territorio físico;
- Está constituido por una población;
- Constituye una sociedad, comunidad u organización política autónoma con gobierno propio; y
- Es una entidad de derecho público y con personalidad jurídica.

Victory (1997) sostiene que el municipio como entidad institucional tiene una doble función:

1. Como entidad básica de la organización territorial del Estado, el municipio actúa como referente territorial para el desempeño de las funciones estatales que requieren este nivel de descentralización y proximidad.
2. Como entidad representativa de su propia comunidad política, el municipio ejerce funciones de autogobierno y auto administración de las colectividades humanas instaladas en su territorio.

Si bien los objetivos que deben responder los municipios son de diversa índole, todos tienen como denominador común, “el bien común local” el cual se traduce en que los municipios buscan:

- Satisfacer las necesidades primordiales de su población, fortalecer la autonomía municipal, asegurar la participación ciudadana en procesos de toma de decisiones, y promover el desarrollo comunitario
- Administrar, fomentar y proteger los intereses locales, promover el desarrollo de sus circunscripciones territoriales, preservar los recursos naturales y el

medio ambiente, y promover la prestación adecuada de los servicios públicos y sociales locales (Sierra, 1998).

Muchas de las competencias municipales tienen fuerte efecto sobre el agua y la cuenca dónde ésta se capta, así como sobre los usos y usuarios del recurso (Jouravlev, 2003). Estas consideraciones prueban que los municipios juegan un doble papel:

- Son grandes usuarios institucionales de agua, que transfieren a otros las externalidades que generan y a su vez afectados por la externalidades que otros producen (Solanes, 2001). Por ello no son diferentes de otros usuarios del agua por lo que requieren el mismo control por los organismo encargados de gestión de recursos hídricos. En este sentido, las normas que regulan la intervención de los municipios “en la gestión del agua”.
- Son promotores, orientadores y administradores de desarrollo socioeconómico a nivel local, cuyas decisiones tienen efectos significativos sobre los sistemas natural y social, y por este medio, sobre el agua, sus usos y usuarios.

Desde la perspectiva de la gestión del agua, la más importante de las competencias municipales son las relacionadas con la prestación de servicios públicos basados en el agua.

### **3.6 La gestión del agua en México**

Desde hace aproximadamente dos décadas, en México, como en la mayoría de los países de América Latina, el manejo en la gestión del agua ha ido cambiando. De hacerse de manera centralizada y a través del gobierno federal, se adoptó a partir de la década de los ochenta, un modelo de mayor descentralización. Acorde con el concepto federal de organización política, en el cual los gobiernos locales, como lo son los estados y los municipios, pasaron a tener mayores atribuciones y funciones en la administración del recurso. Pero antes de definir los espacios temporales en el

cambio de paradigmas en la gestión del agua, es conveniente precisar los conceptos a los que se le habrá de referir, como el propio de gestión del agua:

*“Como una serie de acciones desarrolladas de manera integral por los actores de una cuenca para la conservación, manejo, suministro y disposición del agua en una cuenca, que garanticen la calidad y cantidad para el desarrollo sostenible de la sociedad (Martínez et al., 2005)”.*

Como se observa la definición, el desarrollo sostenible se ha convertido en uno de los pilares que da sustento a la gestión del agua potable en México, con otro referente adicional: que este manejo debe darse por cuencas. Ya que como se afirma: se “ha asumido el enfoque de gestión integrada del agua promovido por agencias como el Banco Mundial, el Consejo Mundial del Agua y el Global Water Partnership. En este enfoque se enfatiza la necesidad de lograr coordinar acciones a nivel local con base en una nueva delimitación por cuenca hidrológica”.

Otra base conceptual que acompaña la gestión del agua es la corresponsabilidad, esto es, lograr una especie de “democratización” del manejo del agua, en el cual todos los involucrados con su uso (teniendo en cuenta sobre todo a aquellos que la utilizan en volúmenes importantes) sean verdaderamente responsables de su buena o mala utilización (Rodríguez, 2008).

### **3.6.1 Los Organismos Operadores del agua en México**

La actividad de aprovechamiento suministro y tratamiento de agua se rige de acuerdo con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En el Artículo 27 se establece que las aguas nacionales son propiedad de la nación, en el Artículo 115 se adjudica la responsabilidad de los gobiernos municipales para prestar los servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de las aguas residuales (CONAGUA, 2014).

La Ley de Aguas Nacionales reglamenta la explotación, aprovechamiento, distribución y control del agua, la cual es de observancia obligatoria en todo el país. Adicionalmente existen las leyes estatales de agua. Este conjunto de instrumentos jurídicos establecen los lineamientos para el aprovechamiento y conservación de este recurso, así como los derechos y obligaciones que asume el Organismo Operador o empresa privada que obtiene una concesión (INEGI, 2011a).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los Organismos de Cuenca y las direcciones estatales de agua, son las instituciones responsables de establecer las políticas para el uso sustentable, la administración, disponibilidad y calidad del agua en el país; apoyan a los Organismos Operadores para realizar sus funciones en las zonas urbanas y rurales.

De acuerdo con los resultados del Censo de agua de 2009, se identificaron 2 517 Organismos Operadores del agua a nivel nacional, dedicados a la captación, tratamiento y suministro de agua, la mayoría se encuentra trabajando en la administración municipal. La cobertura geográfica se captó en el cuestionario censal de los Organismos Operadores considerando las siguientes opciones para la prestación del servicio (INEGI, 2011a):

- a) Toda la entidad.
- b) Todo el municipio.
- c) Sólo cabecera municipal (presta el servicio a partes del municipio).
- d) Cabecera municipal y otras localidades colindantes a la misma.
- e) Intermunicipal.
- f) Otros.

Por el tipo de cobertura geográfica, 1,302 Organismos Operadores de agua trabajaron sólo en las zonas urbanas, donde la concentración de población y de actividades económicas genera más demanda de infraestructura de servicios de agua, mientras que 1,215 organismos prestaron sus servicios tanto en área urbana como en área rural (INEGI, 2011a).

El Organismo Operador, es una unidad económico-administrativa que opera los sistemas de extracción de agua y su distribución, para prestar el servicio de suministro de agua potable y, en algunos casos también tiene funciones de alcantarillado y saneamiento de agua para su reutilización. Los Organismos Operadores de agua presentan diversas características en su estructura y conformación, generalmente se encuentran adscritos al gobierno municipal, representados en direcciones y comisiones de agua potable y saneamiento, o en sistemas descentralizados de agua. También operan como juntas locales y comités de usuarios de agua y, con menor frecuencia como empresas concesionarias privadas. La estructura en la organización y la disponibilidad de infraestructura generan variaciones importantes en la prestación del servicio a los usuarios (INEGI, 2011a).

Por el tipo de cobertura geográfica, los Organismos Operadores de agua tuvieron mayor presencia en las zonas urbanas, debido a que en ellas hay más demanda del servicio de agua para uso doméstico y para realizar actividades económicas; en las cabeceras municipales se reportaron 1,141 de los organismos; en la cabecera municipal y otras localidades prestaron servicios 682 mientras que 439 atendieron los municipios completos (considerando a localidades urbanas y a localidades rurales). En la categoría de otros se encuentran 255 organismos que prestaron servicios en localidades rurales y a toda una entidad federativa (INEGI, 2011a).

### **3.7 El uso de aguas residuales**

La escasez cada vez mayor de las aguas dulces debido al crecimiento demográfico, a la urbanización y, probablemente, a los cambios climáticos, ha dado lugar al uso creciente de aguas residuales para la agricultura, la acuicultura, la recarga de aguas subterráneas y otras áreas. En algunos casos, las aguas residuales son el único recurso hídrico de las comunidades pobres que subsisten por

medio de la agricultura. Si bien el uso de aguas residuales en la agricultura puede aportar beneficios (incluidos los beneficios de salud como una mejor nutrición y provisión de alimentos para muchas viviendas), su uso no controlado generalmente está relacionado con impactos significativos sobre la salud humana. Estos impactos en la salud se pueden minimizar cuando se implementan buenas prácticas de manejo (Mara & Cairncross, 1989).

Las guías para el uso seguro de aguas residuales en la agricultura deben encontrar el balance justo entre la maximización de los beneficios de salud pública y las ventajas de usar recursos escasos. Es necesario que las guías sean lo suficientemente flexibles para adaptarlas a las condiciones locales, sociales, económicas y ambientales. Además, deben implementarse paralelamente con otras intervenciones de salud como la promoción de la higiene, los servicios de agua potable y saneamiento adecuados y otras medidas de atención primaria de la salud.

En 1989, la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó las Guías sobre el Uso Seguro de Aguas Residuales en la Agricultura y Acuicultura. Estas guías han repercutido significativamente en el reúso racional de aguas residuales y excretas en todos los países.

### **3.7.1 Uso agrícola de las aguas residuales**

Como se ha mencionado, la creciente escasez del recurso agua está ocasionando que países donde hay regiones áridas y semiáridas utilicen agua de mala calidad para la agricultura u otras actividades. El agua residual es la más utilizada para la agricultura y su calidad puede ser una amenaza para la agricultura y salud humana. El uso potencial de las aguas residuales en riego agrícola ha presentado efectos positivos y negativos, incluyendo la productividad de los cultivos, la agricultura, la salud del suelo, la calidad del agua, la salud ambiental, la salud pública, entre otros. Los beneficios de las aguas residuales se deben a que contienen nutrimentos que son una fuente de fertilizantes para los cultivos, pero este

benéfico aumenta cuando las aguas residuales son tratadas. Utilizar agua residual sin previo tratamiento en la agricultura origina diversos efectos negativos, derivado de todas las sustancias químicas (metales pesados), bacterias, virus, entre otros patógenos los cuales generan un impacto en la salud humana, en la producción agrícola y en el cambio de uso de suelo (Núñez, 2015).

### **3.7.2 Calidad del agua**

A través de la historia de la humanidad, la acción del hombre sobre la naturaleza ha generado e inducido modificaciones de las que por mucho tiempo ha ignorado su efecto. Actualmente la contaminación de los cuerpos acuáticos es un problema que incrementa su gravedad debido a que diversas prácticas de aprovechamiento de la naturaleza y sus riquezas, implicando efectos que alteran la estabilidad de los ecosistemas, afectan la sustentabilidad de los recursos naturales y actúan sobre la salud de los seres vivos en forma negativa (Martínez, 2002).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua está contaminada cuando su composición se vea alterada de modo que no reúna las condiciones necesarias para el uso al que se la hubiera destinado, en su estado natural. El agua está contaminada cuando su composición química se encuentra alterada o modificada por compuestos ajenos, los cuales pueden provenir, directa o indirectamente, de la actividad antropogénica o por eventos de la naturaleza (Hutchinson, 1957; Jiménez, 2001).

Cuando un río o un lago reciben descargas de aguas residuales o agrícolas, con altos contenidos de nutrientes, puede producirse una fertilización excesiva de las aguas. Ello provoca el envejecimiento prematuro del cuerpo receptor, con la consecuente pérdida de oxígeno disuelto y proliferación de malezas acuáticas (Wetzel, 1981).

Hablar de calidad del agua siempre conlleva a integrar el factor de su utilización para una correcta ponderación de dicha calidad, dado que sus características de composición pueden indicar que son aptas para algunos usos determinados y excluyentes para otros, de modo que se presta menos fácilmente a todas o algunas de las utilidades para las que podría servir en su estado natural (Aguiló *et al.*, 1998).

En la determinación de la disponibilidad del agua en un país, no solamente es necesario saber la cantidad de agua que está al alcance en las diferentes fases del ciclo hidrológico, también es muy importante conocerse las características físico - químicas y bacteriológicas del agua para estar en condiciones de darle un uso en las diferentes actividades productivas y como agua potable en el abastecimiento de poblaciones (Margalef, 1991).

Los criterios y normas de calidad del agua pueden definirse como los niveles o concentraciones que deben respetarse para un uso determinado. Son muchos los usos que pueden darse al agua, pero aquellos que involucran criterios de calidad del agua son principalmente los siguientes: 1) abastecimiento para sistemas de agua potable e industrias alimenticias, 2) usos recreativos, 3) conservación de la flora y fauna, 4) uso agrícola e industrial, 5) acuicultura y riego. El manejo de la calidad del agua se mejora con la aplicación de las normas de calidad para cuerpos receptores y descargas de aguas residuales.

Las aguas residuales pueden definirse como las aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (DOF, 2006)

De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, las aguas residuales son aquellas de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales,

industriales, comerciales de servicios, agrícola, pecuaria, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

De acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas (Blazquez & Montero, 2010) como:

- **Domésticas:** aquellas utilizadas con fines higiénicos. Consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares.
- **Industriales:** son líquidos generados en los procesos industriales. Poseen características específicas, dependiendo del tipo de industria.
- **Infiltración y caudal adicionales:** las aguas de infiltración penetran en el sistema de alcantarillado a través de los empalmes de las tuberías, paredes de las tuberías defectuosas, tuberías de inspección y limpieza, etc. Hay también aguas pluviales, que son descargadas por medio de varias fuentes, como canales, drenajes y colectores de agua de lluvia.
- **Pluviales:** son agua de lluvia, que descargan grandes cantidades de agua sobre el suelo. Parte de esta agua es drenada y otra escurre por la superficie, arrastrando arena, tierra, hojas y otros residuos que pueden estar sobre el suelo.

Los principales contaminantes del agua son los siguientes (Blazquez & Montero, 2010):

- Aguas residuales y otros residuos que demandan oxígeno (en su mayor parte materia orgánica, cuya descomposición produce la desoxigenación del agua).
- Agentes infecciosos.

- Nutrientes vegetales que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas. Éstas, a su vez, interfieren con los usos a los que se destina el agua y, al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores fétidos.
- Productos químicos, incluyendo los pesticidas, varios productos industriales, las sustancias tensoactivas contenidas en los detergentes, y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos.
- Petróleo, especialmente el procedente de los vertidos accidentales.
- Minerales inorgánicos y compuestos químicos.
- Sedimentos formados por partículas del suelo y minerales arrastrados por las tormentas y escorrentías desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección, las explotaciones mineras, las carreteras y los derribos urbanos.
- Sustancias radiactivas procedentes de los residuos producidos por la minería y el refinado del uranio y el torio, las centrales nucleares y el uso industrial, médico y científico de materiales radiactivos.
- El calor también puede ser considerado un contaminante cuando el vertido del agua empleada para la refrigeración de las fábricas y las centrales energéticas hace subir la temperatura del agua de la que se abastecen.

En cuanto a la normatividad internacional en materia de reúso de agua tratada se encuentran las directrices propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) en la Ley de Agua Limpia (CWA, por sus siglas en inglés), la Unión Europea (U. E, 2014) mediante las Normas de calidad ambiental aplicables a las aguas superficiales; y el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME) con las guías sobre calidad del agua.

### **3.7.3 Calidad del agua de riego**

Es un término que se utiliza para indicar la conveniencia o limitación del empleo del agua, con fines de riego de cultivos agrícolas, cuya determinación generalmente se toma como base las características químicas del agua; así como la tolerancia de

los cultivos a las sales, las propiedades de los suelos, aguas y las condiciones climatológicas (Palacios & Aceves, 1994).

La calidad del agua para riego ha sido objeto de innumerables investigaciones orientadas hacia la evaluación y definición de parámetros para calificar sus características físicas y químicas, lo cual ha conducido a la proposición de varios sistemas para su clasificación (García, 2012).

La calidad del agua de riego puede variar significativamente según el tipo y cantidad de sales disueltas; estas se encuentran en concentraciones relativamente pequeñas pero significativas. Los diferentes tipos de sales se transportan disueltas en el agua, y son depositadas en los suelos. A medida que el agua se evapora, o es absorbida por los cultivos agrícolas, las sales se acumularán en el suelo y a determinado tiempo actuarán en contra de los cultivos intolerantes a la salinidad (Marín *et al.*, 2002).

#### **3.7.4 Metales pesados**

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino *et al.*, 2002).

Los metales pesados son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes cultivos. La bioacumulación significa un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente (Angelova *et al.*, 2004). En un pequeño grado se pueden incorporar a organismos vivos (plantas y animales)

por vía del alimento y lo pueden hacer a través del agua y el aire como medios de traslocación y dependiendo de su movilidad en dichos medios (Lucho *et al.*, 2005).

Los metales pesados se encuentran presentes en el suelo como componentes naturales del mismo o como consecuencia de las actividades antropogénica. Algunos de estos metales son esenciales en la nutrición de las plantas, así son requeridos algunos de ellos como el Mn, imprescindible en el fotosistema y activación de algunas enzimas para el metabolismo vegetal (Mahler, 2003).

### **Cadmio**

El cadmio es un elemento relativamente raro que algunas actividades humanas liberan a la atmósfera, la tierra y el agua, es considerado como uno de los metales más ecotoxicológicos que muestran efectos adversos en todos los procesos biológicos de los seres humanos, animales, y plantas. Ingresa al suelo por el uso de agroquímicos en la agricultura, el contacto con aguas residuales, el uso de aguas de riego que contengan este elemento o por la degradación sobre la superficie de partículas húmedas y secas que son arrastradas por el aire provenientes de procesos industriales (Rodríguez *et al.*, 2008).

El cadmio se moviliza a través del suelo dependiendo de factores como el pH y el contenido de materia orgánica (Kabata-Pendias, 2011). En la planta, el cadmio se acumula básicamente en la raíz secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale 2004). La principal fuente de contaminación de cadmio en el ser humano es la ingesta de vegetales contaminados con este metal (Norvell *et al.*, 2000).

Los efectos en el ser humano dependen de la cantidad consumida y oscilan desde los simples dolores abdominales y diarreas hasta provocar enfisema pulmonar. Exposiciones prolongadas pueden provocar lesiones renales, con

descalcificación de huesos y deformaciones óseas. La ingesta semanal tolerable de cadmio (propuesta por la European Food Safety Authority Scientific (EFSA)) es de 2.5 µg por kg de peso corporal (EFSA, 2011; EFSA, 2012)

## **Níquel**

Es un elemento metálico magnético, de aspecto blanco plateado, utilizado principalmente en aleaciones, puede ser liberado al ambiente por las chimeneas de grandes hornos usados para fabricar aleaciones o por plantas de energía e incineradores de basura, puede encontrarse como un contaminante en fertilizantes, aguas de riego, fangos cloacales y desechos animales. La gran mayoría de níquel liberada al ambiente termina en el suelo o en sedimento en donde se adhiere fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso (Brown *et al.*, 1987).

Existen estudios que demuestran que algunas plantas pueden incorporar y acumular níquel, esto en función de las propiedades del suelo y la capacidad de absorción. El níquel se vuelve menos accesible para la absorción de la planta a medida que el pH del suelo aumenta. Niveles altos de zinc, cobre, hierro, cobalto, cadmio o magnesio en el medio de cultivo pueden causar una deficiencia de níquel. Las primeras etapas de la toxicidad de níquel no muestran síntomas visuales claros, pero el crecimiento de raíces y apical es a menudo inhibido. Eventualmente los síntomas se muestran, y avanzan desde la clorosis intravenosa o que causa manchas en las hojas (Brown *et al.*, 1987).

La esencialidad del níquel no ha sido demostrada hasta el momento, la ingesta por vía oral pueden causar efectos nocivos en riñón, bazo, pulmones y sistema mieloide, aparato reproductor (Fernández *et al.*, 2007). La OMS ha propuesto una ingesta diaria tolerable de níquel de 12 µg por kg de peso corporal derivada de un bajo nivel de efecto adverso observado (WHO, 2008).

## Plomo

El plomo es un metal tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre. Su uso generalizado ha dado lugar en muchas partes del mundo a una importante contaminación del medio ambiente, un nivel considerable de exposición humana y graves problemas de salud pública (WHO, 2013).

El plomo y sus compuestos pueden penetrar en el medio ambiente durante la minería, la fundición, procesado, utilización, reciclado o deshecho. El plomo se utiliza principalmente en baterías, cables, pigmentos, cañerías, gasolina, productos de soldadura y acero, envasado de alimentos, vidrio, productos de cerámica y plaguicidas. Los alimentos, el aire, el agua y el suelo son las principales fuentes potenciales de exposición. En el suelo el plomo tiene una gran afinidad con las sustancias húmicas y el pH, depende de ellos para fijarse, pero debido a que es poco móvil permanece en los horizontes superiores y no es asimilado en grandes cantidades por las plantas (Montilla & Acosta, 2012).

El plomo puede penetrar en el organismo por tres vías: respiratoria, digestiva y cutánea, siendo ésta última de escasa entidad. Tras ser absorbido, el plomo en el organismo sigue un modelo tricompartmental: el sanguíneo (el 2% del contenido total, cuya vida media es de  $36 \pm 5$  días), el de los tejidos blandos (cuya vida media es algo más prolongada) y el óseo (que representa el 90% del contenido total con una vida media entre 10 y 28 años). Ocasiona efectos tóxicos sobre el tracto gastrointestinal, sobre el sistema renal, así como interferencias con sistemas enzimáticos implicados en la síntesis del grupo hemo<sup>5</sup> (Rubio *et al.*, 2004). EFSA ha considerado que no se puede establecer una ingesta semanal tolerable para el plomo, pero se ha calculado una cuyo menor valor es de 0.5 µg por kg de peso corporal (EFSA, 2010).

---

<sup>5</sup> El grupo hemo es un grupo prostético que forma parte de diversas proteínas, entre las que destaca la hemoglobina, presente en los eritrocitos de la sangre.

### 3.8 Absorción de metales pesados en suelo y planta

El riesgo potencial de que se produzca una contaminación por metales pesados, y de su acumulación en las plantas de cultivo, está directamente relacionado con la movilidad y disponibilidad de los metales en los suelos. La mayor o menor retención o movilidad depende de la acción combinada de varios factores, incluyendo la naturaleza del metal y su concentración en el suelo, factores ambientales, y constituyentes del suelo. Estos factores determinan el equilibrio de los metales entre la fase sólida y la solución del suelo, a través de procesos tales como precipitación, disolución, adsorción-desorción, complejación-disociación y oxidación-reducción (He *et al.*, 2005).

La movilidad de un metal no sólo depende de su especiación química, también del pH debido a que en suelos ácidos se produce una competencia entre los iones de hidrógeno ( $H^+$ ) y los cationes metálicos por los sitios de intercambio, aumentando su concentración y biodisponibilidad en el suelo, influyendo directamente en la absorción de iones por las raíces. Por otra parte, un elevado valor de pH provoca que estos iones metálicos queden adsorbidos en las partículas del suelo, disminuyendo así su biodisponibilidad (Sauve *et al.*, 2000; Santiago, 2013,)

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta (Prieto *et al.*, 2009).

### **3.9 Teorías sobre la percepción**

La percepción es un área de investigaciones teóricas y empíricas de la psicología, de la cual han surgido diversos modelos teóricos, entre los cuales encontramos la teoría sensorial o asociacionista y la teoría de la Gestalt.

#### **3.9.1 Teoría asociacionista**

Su principal premisa es la distinción entre sensación y percepción (esta última más cercana al concepto de conocimiento), bajo esta denominación se conocen las aportaciones a la psicología de diversos autores a través de la historia. Desde Aristóteles que planteaba un estudio de cómo asociar una idea con otra, los empiristas ingleses John Locke y David Hume que enfatizaron la importancia de las asociaciones en la percepción sensorial, y considerando a otros filósofos, el asociacionismo ha derivado hasta el siglo XX en que el término alude a la asociación que se establece entre un estímulo y la correspondiente respuesta (Margalef, 1987).

Para esta corriente teórica se perciben primero sensaciones aisladas, posteriormente el cerebro asocia estas sensaciones entre sí, mediante una suma de elementos aislados hasta construir la percepción global del objeto.

#### **3.9.2 Teoría de la Gestalt**

Es una corriente de pensamiento dentro de la psicología moderna, surgida en Alemania a principios del siglo XX, y cuyos exponentes más reconocidos han sido los teóricos Max Wertheimer, Kohler, Kurt Koffka y Kurt Lewin. Esta escuela afirma que la mente configura, a través de ciertas leyes, los elementos que llegan a ella a través de los canales sensoriales (percepción) o de la memoria (pensamiento, inteligencia y resolución de problemas). En nuestra experiencia del medio ambiente, esta configuración tiene un carácter primario por sobre los elementos que la conforman, y la suma de estos últimos por si solos no podría llevarnos, por tanto, a la comprensión

del funcionamiento mental. Este planteamiento se ilustra con el axioma el todo es más que la suma de las partes, con el cual se ha identificado con mayor frecuencia a esta escuela psicológica (Asch, 1968).

El término Gestalt es traducido al castellano como *forma* o contorno, en este contexto, los límites de un objeto constituyen una información relevante para la generación de abstracciones, plantea que en la relación sujeto-objeto, el sujeto es aquel encargado de extraer información relevante del objeto. Esta información rescata la estructura misma del objeto, es decir, aquello que resulta esencial para hacerlo idéntico consigo mismo y permitirle diferenciación de otros objetos (Asch, 1968; Oviedo, 2004).

La forma de los objetos, constituye todo aquel conjunto de información relevante y oportuna que permite representar el objeto. El organizar los objetos a través de su *forma* equivale a tener de ellos una versión *racional* que ofrece una idea clara, precisa e inconfundible de lo que la caracteriza. Darle forma a un objeto equivale a darle sentido, a hacerlo propio y permitirle mostrarse de manera inconfundible a la conciencia, y con ello facultar la posibilidad de desarrollar estados imaginativos como el poderlos contrastar con otros, pensarlos en otros contextos, compararlos en diferentes momentos de la memoria, etc. (Oviedo, 2004).

La Gestalt es una teoría encargada de plantear la tendencia de la conciencia a la racionalidad. El fin último y principal labor de la conciencia, es el de traducir las experiencias cotidianas a entidades conceptuales con base en las cuales se pueda seguir adelantando un proceso de abstracción (Oviedo, 2004).

### **3.9.3 Percepción ambiental**

La percepción ambiental implica el proceso de conocer el ambiente físico inmediato a través de los sentidos, al mismo tiempo interviene las actitudes que con

respecto al ambiente son los sentimientos favorables o desfavorables que las personas tienen hacia las características del ambiente físico (Flores & Reyes, 2010)

Para Gibson (1974) “La percepción es un proceso instrumental adaptativo del organismo a su medio, como primer paso del conocimiento que está en función directa de la estimulación de los componentes del medio ambiente”, el organismo deberá responder de forma automática a los aspectos significativos del medio, señala que en el ambiente existe más cantidad de información de la que el organismo es capaz de registrar, ya sea por limitación biológica, de desarrollo o educativa que la percepción ambiental es un proceso complejo y activo que involucra componentes cognoscitivos, afectivos, interpretativos y evaluativos, que operan de manera simultánea en un mismo tiempo y espacio. La percepción ambiental no se encuentra sesgada a las características físicas del ambiente, toda vez que incluye la experiencia y la participación dentro del sistema que involucra al ser humano y al ambiente (Gibson, 1978).

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Caracterización de la zona de estudio

El presente estudio se realizó en parte del área de dos municipios, en Atlixco, donde se encuentra la PTAR ubicada en la colonia Juan Uvera y en Huaquechula donde se encuentran los campos de riego de la Junta Auxiliar de Santa Ana Coatepec que recibe las aguas tratadas (Figura 8).



Figura 8. Zona de estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de metadatos de CONABIO, y software ArcGIS 10.1

#### 4.1.1 Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Atlixco

La planta tratadora de aguas residuales (PTAR) del municipio de Atlixco, se localiza en la colonia Juan Uvera, en Atlixco, Puebla (Figura 8). La planta fue diseñada para tratar  $150 \text{ L s}^{-1}$ , actualmente opera al 50% debido a que solo se

equipó para operar de esta manera, aunque se tiene el proyecto de equiparla para que funcione a la capacidad para la que fue construida.

El proceso para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de Atlixco, consta de las siguientes etapas:

1.- Tratamiento Primario Preliminar, conformado por una caja de excedencias, un canal equipado con rejillas para el cribado de sólidos gruesos, equipado con dos rejillas de 75 y 25 mm de abertura y 3 canales de desarenadores de flujo horizontal, equipados con compuerta de control (Figura 9).



Figura 9. Tratamiento primario. Caja de disipación (1), Rejillas (2), Desarenadores (3)

Fuente: Olvera B. I. 2015

2.- Un sistema para la medición del flujo de entrada a la planta de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de vertederos proporcionales, instalados en cada uno de los tres canales que conforman el canal de desarenado múltiple (Figura 10).



Figura 10. Canal de desarenado

Fuente: Olvera B. I. 2015

3.- Un cárcamo de bombeo, que alimenta el resto de las unidades de tratamiento de la planta. El cárcamo cuenta con tres líneas de tubería de descarga, para instalar las bombas sumergibles para el bombeo de agua residual hacia los procesos subsiguientes de la PTAR y una línea de retorno o desfogue del cárcamo de agua residual (Figura 11).



Figura 11. Cárcamo de bombeo

Fuente: Olvera B. I. 2015

4.- Un sistema de tratamiento biológico de tipo anaerobio. Un reactor UASB, por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). El volumen total del reactor ( $4,320 \text{ m}^3$ ) está dividido en cuatro módulos iguales, cada uno de  $1,080 \text{ m}^3$ . El reactor UASB cuenta con todos los elementos necesarios para su adecuado funcionamiento: sistema de alimentación; sistema de medición de lodos; sistema para la purga de lodos; sistema de separación de tres fases (gas, sólido, líquido) y sistema para recolección y evacuación de efluente (Figura 12).



Figura 12. Módulos del reactor UASB

Fuente: Olvera B. I. 2015

5.- Medición del flujo a través de los reactores UASB. El volumen total de agua residual que está ingresando al UASB se determina mediante la suma de los caudales individuales de ingreso a cada una de los reactores, los cuales se determinan mediante caudalímetros de flujo másico, ubicados en la caja de distribución de flujo en la entrada a cada una de las líneas de alimentación que conduce a cada reactor individual. Cada reactor cuenta con una válvula de control manual que permite al operador ajustar el caudal recibido (Figura 13).



Figura 13. Válvulas de control de reactor UASB

Fuente: Olvera B. I. 2015

6.- Sistema de Tratamiento Secundario de tipo Aerobio. El efluente del UASB se pasa a una etapa de Tratamiento Secundario Aerobio en un sistema de crecimiento adherido conocido como filtro percolador. El filtro está dividido en cuatro módulos iguales, con capacidad para manejar  $37.5 \text{ L s}^{-1}$ . Este filtro percolador está lleno con un material de soporte (panel-plástico), sobre el cual crecen los microorganismos aerobios encargados de la depuración del agua. Cada filtro dispone de un sistema de distribución de agua en la parte superior y de un sistema de recirculación del efluente del mismo (Figura 14).



Figura 14. Tratamiento secundario. Filtro percolador (1), Panel plástico (2), Tanque de recirculación (3)

Fuente: Olvera B. I. 2015

7.- Sedimentadores secundarios. El tratamiento secundario se completa con el paso del efluente del filtro percolador, a través de un sedimentador que retiene la biomasa que se desprende del filtro (Figura 15).



Figura 15. Sedimentadores

Fuente: Olvera B. I. 2015

8.- Manejo de lodos en exceso del sistema aerobio. El exceso de lodos del sistema aerobio es enviado nuevamente al tratamiento primario para su introducción al reactor UASB, donde son digeridos y estabilizados inicialmente; estos lodos ayudan al crecimiento de la biomasa requerida dentro del UASB.

9.- Sistema de desinfección. El efluente final del sistema es mezclado con una solución rica en cloro y conducido a un tanque de contacto (donde permanece el

tiempo apropiado para que se den las condiciones necesarias para lograr la desinfección del agua) y finalmente se envía al cuerpo receptor a través del emisor final (Figura 16).



Figura 16. Tanque de contacto con cloro

Fuente: Olvera B. I. 2015

10.- Medición del caudal total de agua tratada por la planta. La salida del tanque de contacto con cloro se conecta a un canal Parshall en el que se tiene instalado un sistema de medición de flujo ultrasónico conectado a un sistema de captura y almacenamiento de información (totalizador de flujo), para determinar diariamente el caudal total del agua tratada en la planta.

11.- Manejo de lodos en exceso del Reactor UASB. Salvo por la basura y arena que es retenida en el Tratamiento Primario, el sistema produce lodos biológicos (biomasa) en exceso que deben disponerse adecuadamente. La única salida de lodos del sistema se hace a través del reactor UASB. Dadas las condiciones bioquímicas del proceso, estos lodos se encuentran digeridos y estabilizados. Los lodos se envían a dos tanques (de almacenamiento temporal y preparación) donde se alimenta un filtro prensa de bandas. Varios estudios<sup>6</sup> muestran que estos lodos secos pueden usarse como acondicionamiento en suelos agrícolas. En última instancia, una vez secos, son llevados al relleno sanitario del municipio (Figura 17).

---

<sup>6</sup> Estudios realizados en Aguascalientes, México, en cultivo de pasto ballico (Robledo *et al.*, 2010), en Valle del Mezquital, Hidalgo, México, en cultivos de frijol bajo condiciones de invernadero (Vázquez & Ruiz, 2013) y en Santa Fe, Argentina, en producción de sorgo y avena (Pilatti *et al.*, 2014) por mencionar algunos.



Figura 17. Manejo de lodos

Tanque de lodos (1), Estabilización de lodos (2), Prensa de bandas (3)

Fuente: Olvera B. I. 2015

12.- Calidad del agua tratada. El agua tratada debe cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996, descarga a ríos “tipo A”. Dado el origen de las aguas residuales tratadas, la biomasa obtenida del proceso debe cumplir con la NOM-004-2002 que establece los límites máximos permisibles para los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales y puedan usarse como acondicionadores del suelo.

La comunidad de Santa Ana Coatepec recibe el agua tratada, a través del canal principal abastecido por el Río Cantarranas (cuerpo receptor del agua residual tratada) y el efluente es empleado en el riego de cultivos.

#### **4.1.2 Zona agrícola de Santa Ana Coatepec**

Santa Ana Coatepec es una localidad perteneciente al municipio de Huaquechula, Puebla, se sitúa a 1,700 metros de altitud sobre el nivel del mar, sus coordenadas geográficas son: 18° 50' 07” Latitud Norte y 98° 25' 57" Longitud oeste.

La población total en 2010 fue de 1,147 habitantes, con grado de marginación alto (SEDESOL, 2015), el 39% de esta población se dedica a actividades agrícolas y ganaderas (SEDESOL, 2013).

La agricultura es la actividad preponderante en esta localidad. El principal afluente es el “canal principal” derivado del Río Cantarranas (cuerpo receptor de agua residual tratada). El canal principal abastece la zona agrícola de riego de Santa Ana Coatepec, mediante tres compuertas, la primera denominada “El Potrero”.

La primera compuerta distribuye agua para regar 120 hectáreas, para 100 usuarios. Los principales cultivos de esta área son: maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), maíz forrajero (*Zea mays*), alfalfa (*Medicago sativa*), sorgo (*Sorghum*), calabacita (*Cucurbita pepo*), ejote (*Phaseolus vulgaris*), huauzontle (*Chenopodium nuttalliae*), tomate (*Physalis philadelphica*), té limón (*Cymbopogon citratus*), albahaca (*Ocimum basilicum*), tomillo (*Thymus*), orégano (*Origanum vulgare*), santa maría (*Tanacetum balsamita*), principalmente.

#### **4.2 Técnicas de investigación**

Por tratarse de una investigación interdisciplinaria se utilizaron dos enfoques: el técnico, que requirió un análisis fisicoquímico del afluente y determinación de presencia de metales pesados en suelo y planta, y el enfoque social, utilizado para captar la percepción de los productores respecto al efecto generado por el uso de las aguas tratadas.

Estas técnicas de investigación se abordaron mediante el enfoque ecosistémico recomendado por la GIRH, considerando tres de los cinco pasos sugeridos:

Paso A: Determinación de los principales actores, definición del área del ecosistema, y desarrollo de las relaciones entre ellos.

Paso B: Caracterización de la estructura y función del ecosistema y elaboración de mecanismos para su manejo y monitoreo.

Paso D: Determinación de impactos probables sobre ecosistemas adyacentes.

### 4.2.1 Enfoque técnico

Primeramente se definieron los sistemas de estudio, a partir de la delimitación de la zona de estudio, mediante recorridos de campo para ubicar los puntos de muestreo de agua, suelo y planta. Se encontró que el agua que entra a la Planta de Tratamiento proviene de la zona centro de la ciudad de Atlixco. El agua tiene un uso consuntivo, por lo que una vez cumplido su propósito primario se desecha al sistema de drenaje a través de una línea de conducción que dirige este recurso a la Planta de Tratamiento. Terminado el proceso de tratamiento se conduce al Río Cantarranas donde se juntan los dos tipos de agua que entran al “canal principal” que abastece la zona agrícola de Santa Ana Coatepec (Figura 18).

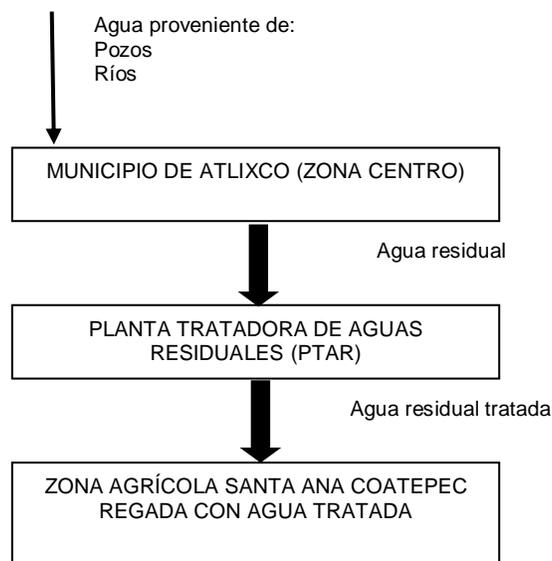


Figura 18. Sistemas identificados en la zona de estudio

Elaboración propia a partir de datos de campo

Posteriormente se determinaron los puntos principales de muestreo: para agua se seleccionaron tres sitios; para suelo se determinaron dos predios: uno en el punto inmediato de llegada del agua de la compuerta “El Potrero” y el segundo en un punto medio, ambos irrigados con agua del canal principal. Se eligieron los tres cultivos más importantes de la comunidad: calabacita, té limón y huauzontle (Figura 19).

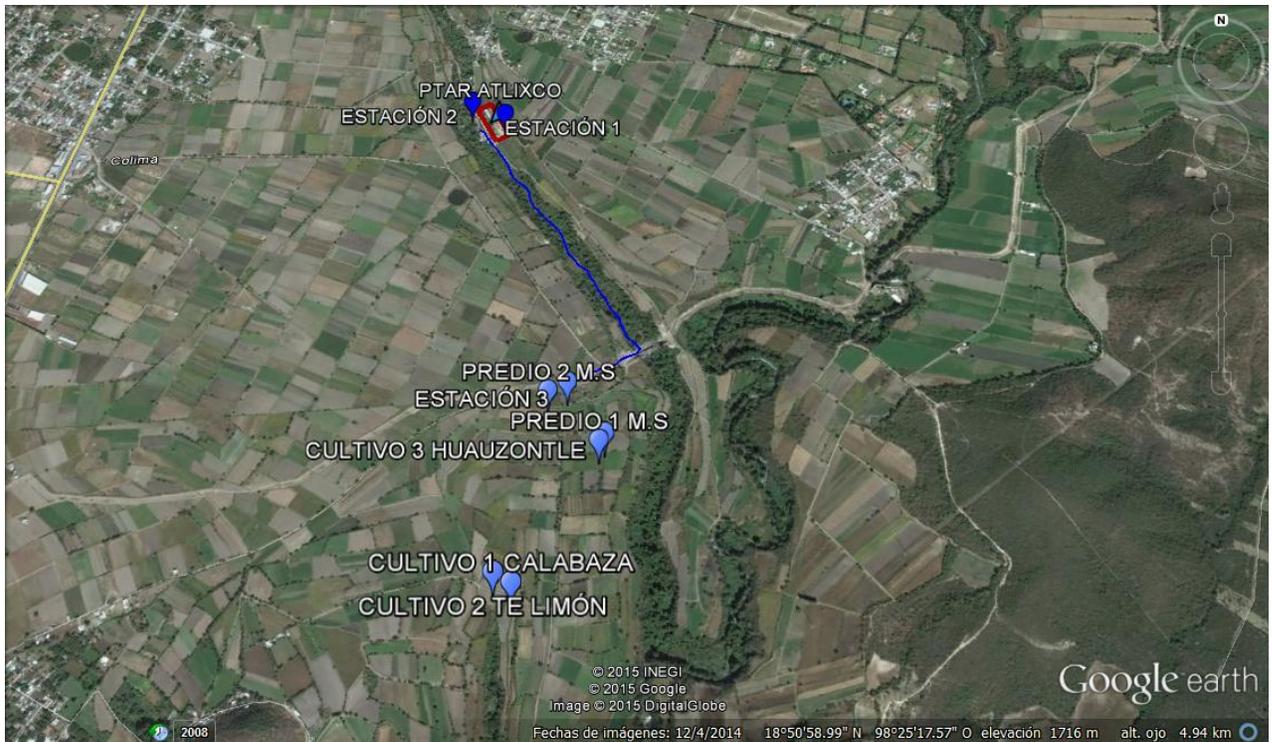


Figura 19. Ubicación de puntos de muestreo

Elaboración propia a partir de Google earth, INEGI 2015.

Se determinaron los parámetros a analizar de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, en el caso de aguas residuales y la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos y metales pesados en cultivos.

#### 4.2.1.1 Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se basó en las hipótesis de estudio. En el Cuadro 5 se muestran las tres variables: agua, suelo y planta, su definición, el tipo de indicadores, escala de medición, la técnica e instrumentos utilizados.

Cuadro 5. Operacionalización de variables

Variable	Objetivo	Tipo de variable	Indicadores	Escala de medición	Técnica	Instrumento
Calidad del agua tratada	Evaluar las condiciones del agua residual municipal respecto a características físicas, químicas y biológicas después de ser sometida a un tratamiento.	Cuantitativa	Físico-químicos pH Conductividad eléctrica Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup> Na <sup>1+</sup> K <sup>1+</sup> Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ) Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ) Carbonatos (CO <sup>-2</sup> ) Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) Cloruros (Cl <sup>-1</sup> ) DBO <sub>5</sub> <sup>+</sup>  Metales pesados Pb Cd Ni	Razón	NMX-AA-008 Conductímetro NMX-AA-072 NMX-AA-072 Flamometría Flamometría NMX-AA-079 NMX-AA-074 NMX-AA-029 NMX-AA-029 Volumetría NMX-AA-073 NMX-AA-28  NMX-AA-051 NMX-AA-051 NMX-AA-051	Análisis de laboratorio
Calidad de suelo	Medir la calidad del suelo mediante indicadores como son pH, C.E, y contenido de materia orgánica, así como la presencia de metales pesados.	Cuantitativa	Materia orgánica pH CE  Metales pesados Pb Cd Ni	Razón	NMX-AA-21 NMX-AA-25  NMX-AA-051 NMX-AA-051 NMX-AA-051	Análisis de laboratorio
Calidad de planta	Determinar el contenido de metales pesados en cultivos.	Cuantitativa	Metales pesados Pb Cd Ni	Razón	NMX-AA-051 NMX-AA-051 NMX-AA-051	Análisis de laboratorio

Fuente: Elaboración propia marzo 2015

#### 4.2.1.2 Muestreo de agua

El plan de muestreo fue primordial, pues permitió la obtención de muestras representativas del fenómeno estudiado. Durante la ejecución se identificaron las muestras y se registraron las condiciones de muestreo: cada frasco se rotuló con el

nombre del punto de muestreo. En la(s) planilla(s) de muestreo correspondiente, se consignó toda la información necesaria: fecha y hora de recolección, tipo de muestra (puntual o compuesta) y parámetros medidos en el sitio. Actualmente no existen normas absolutas para la elección de puntos para recoger las muestras ya que la selección está íntimamente relacionada a las condiciones locales que varían de acuerdo al lugar, en lo posible se recomienda establecer puntos de muestreo permanentes, tratando de asegurar condiciones de muestreo reproducibles. Una vez recolectadas las muestras se almacenaron según lo establecido para cada parámetro. Para la conservación de muestras se emplearon neveras portátiles de acuerdo a lo recomendado por Severiche *et al.* (2013).

Para tener un panorama de la calidad del agua de acuerdo a los objetivos planteados, se seleccionaron 3 puntos (Figura 20):

- Ingreso del agua a la PTAR.
- Egreso del agua de la PTAR.
- Primer distribuidor hacia los cultivos.



Figura 20. Determinación de parámetros *in situ*

Fuente: Olvera B. I. 2015

En cada punto se realizó un muestreo compuesto colectando agua en tres momentos cada dos horas. En cada punto de muestreo se determinaron parámetros hidrológicos en campo: coordenadas, hora, altitud (msnm), temperatura de agua (°C), pH, conductividad ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ) y materia flotante (Figura 21).



Figura 21. Muestreo y preservación de muestras

Fuente: Olvera B. I. 2015

Las muestras se depositaron en frascos de plástico y su traslado al laboratorio se realizó manteniendo una temperatura menor a 4°C, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Cuadro 6).

Cuadro 6. Especificaciones técnicas de muestreo y preservación de muestras NOM-001-SEMARNAT-1996.

PARÁMETRO	Envasado	Preservación
pH <sup>1</sup>	n.e <sup>2</sup>	<i>In situ</i>
Conductividad eléctrica dS m <sup>-1</sup>	n.e	<i>In situ</i>
Ca <sup>2+</sup> mg L <sup>-1</sup>	P3	Refrigerado a 4°C
Mg <sup>2+</sup> mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Na <sup>+</sup> mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
K <sup>1+</sup> mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Carbonatos (CO <sup>-2</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Cloruros (Cl <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
DBO <sub>5</sub> mg L <sup>-1</sup>	p	Refrigerado a 4°C
Pb	p	Enjuagado el envase con HNO <sub>3</sub> 1 + 1; adicionar HNO <sub>3</sub> a pH<2. Refrigerar a 4°C
Cd	p	Enjuagar el envase con HNO <sub>3</sub> 1 + 1; adicionar HNO <sub>3</sub> a pH<2. Refrigerar a 4°C
Ni	p	Enjuagar el envase con HNO <sub>3</sub> 1 + 1; adicionar HNO <sub>3</sub> a pH<2. Refrigerar a 4°C

1= Potencial hidrógeno, 2= no especificado en la norma, 3= plástico

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de NOM-001-SEMARNAT-1996

Las muestras de agua se analizaron conforme a los procedimientos establecidos para cada parámetro en las Norma Oficial Mexicana para análisis de agua concentradas en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Normas y métodos de análisis de aguas residuales

Parámetro	Método
pH	NMX-AA-008
Conductividad eléctrica dS m <sup>-1</sup>	Conductímetro
Ca <sup>2+</sup> mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-072
Mg <sup>2+</sup> mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-072
Na <sup>1+</sup> mg L <sup>-1</sup>	Flamometría
K <sup>1+</sup> mg L <sup>-1</sup>	Flamometría
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-079
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-074
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-029
Carbonatos (CO <sup>-2</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	Volumetría
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	Volumetría
Cloruros (Cl <sup>-1</sup> ) mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-073
DBO <sub>5</sub> mg L <sup>-1</sup>	NMX-AA-028
Pb	NMX-AA-051
Cd	NMX-AA-051
Ni	NMX-AA-051

Fuente: Elaboración propia, marzo 2015

#### 4.2.1.3 Muestreo de suelo

Los objetivos de un análisis de suelo son: caracterizar químicamente el material y determinar el potencial de abastecimiento de nutrimentos para las plantas, con el propósito de diagnosticar una deficiencia o toxicidad de un elemento en el suelo, o realizar una recomendación para la fertilización futura. El énfasis en el análisis de un suelo radica en la importancia de conocer su capacidad como medio para el desarrollo de las plantas (Mckean 1993, Alcántar *et al.*, 1992).

Lo más importante del muestreo es que las muestras de suelo representen la fertilidad. Los resultados pueden variar, pero esta variación debe reflejar la verdadera variación en el campo y no el error de laboratorio. El valor del análisis depende mucho en un muestreo eficaz.

La variabilidad que se encuentra en el campo no es solo vertical sino también horizontal y puede ser natural o inducida. No se puede analizar todo el campo, entonces se han desarrollado varios procedimientos para recoger muestras representativas de esta variabilidad (James y Wells, 1990). El método de muestreo no debe afectar los resultados si se hace bien. El método más común es el de la muestra compuesta. Se toman unos núcleos seleccionados al azar sobre un área dentro del campo. Se combina estos núcleos para obtener una muestra compuesta mucho más representativa del promedio de lo que existe en el campo (Bernier, 2011).

Antes de llevar las muestras de suelo al laboratorio es muy importante identificarlas bien. Generalmente para preparar el suelo, se seca al aire y se pasa por un tamiz de 2 mm (Malla # 10). Este tratamiento de las muestras de suelo está estandarizado y permite una comparación entre laboratorios y también facilita el manejo de la muestra dentro del laboratorio. A veces se pone la muestra en un horno para secarla más rápido. Las temperaturas no deben ser muy elevadas porque esto puede cambiar algunas propiedades del suelo. Una temperatura entre 35 y 50°C es recomendada (James y Wells, 1990; Alcántar *et al.*, 1992). El proceso de secar el suelo puede causar cambios en las características químicas y físicas del suelo ya que puede absorber elementos del ambiente, por ello el proceso de secado debe realizarse en el menor tiempo posible (Alcántar *et al.*, 1992).

Con las consideraciones anteriores y con base a la NOM-021-SEMARNAT-2000, se tomaron 10 submuestras por cada parcela (2 parcelas elegidas al azar) utilizando el método de “zigzag”, a una profundidad de 30 cm, para posteriormente obtener una

muestra compuesta representativa mediante el método de cuarteo y siguiendo un proceso como se indica en la Figura 22.

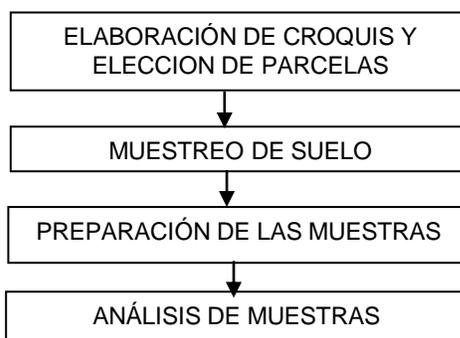


Figura 22. Proceso de muestreo de suelo

Elaboración propia a partir de datos de campo, mayo 2015

El muestreo se realizó el día 13 de mayo de 2015 en ambos sitios. La muestra no. 1 se tomó en el predio del Sr. Fortunato Munive, el cultivo anterior en este predio fue maíz para forraje (cañuela). La muestra no. 2 se tomó en el predio de la Sra. Petra Domínguez, el cultivo anterior fue maíz para grano (Cuadro 8 y Figura 23).

Cuadro 8. Datos sobre muestreo de suelo

Propietario	Cultivo anterior	# Muestra compuesta	Profundidad	Ubicación	
				N	W
Fortunato Munive	Cañuela	1	30 cm	18° 50' 48.16"	98° 25' 21.31"
Petra Domínguez	Maíz grano	2	30 cm	18° 50' 54.19"	98° 25' 26.58"

Elaboración propia a partir de datos de campo



Figura 23. Muestreo de suelo

Fuente: Olvera B. I. 2015

#### 4.2.1.4 Muestreo de planta

Algunos de los objetivos del análisis de plantas son los siguientes: Diagnosticar o confirmar síntomas de deficiencia o toxicidad de un elemento en la planta, indicar la cantidad de nutrientes del suelo que hayan sido aprovechados por la planta, indicar la interrelación entre los nutrientes (Mckean, 1993). El análisis de tejido tiene varias etapas:

- El muestreo.
- La preparación de la muestra.
- El análisis químico.
- La interpretación de los resultados.

El muestreo es una parte muy importante del análisis. Debe considerar la especie de la planta, su edad, la parte de la planta muestreada y el tiempo de muestreo, porque todos pueden afectar la interpretación de los resultados. La elección de una muestra compuesta es importante para conocer una distribución homogénea de los elementos contenidos en dicha muestra (Alcántar & Sandoval, 1999).

Para esta investigación se seleccionaron los tres cultivos más importantes de la comunidad regados con aguas tratadas de la PTAR: calabacita (*Cucurbita pepo*), té limón (*Cymbopogon citratus*) y huazontle (*Chenopodium nuttalliae*). Se tomaron 5 muestras de cada cultivo, en estado maduro, en fructificación y en competencia completa (Figura 24, Cuadro 9).



Figura 24. Muestreo de planta

Fuente: Olvera B. I. 2015

Cuadro 9. Datos sobre muestreo de planta

Propietario	Cultivo	Ubicación		Parte muestreada de la planta
		N	W	
Gabino Rosas	Calabaza	18° 50' 33.00"	98° 25' 30.64"	Raíz, tallo, hoja, flor y fruto
Heladio Domínguez	Té limón	18° 50' 34.66"	98°25'31.34"	Raíz, tallo, hoja
Agustín Domínguez	Huazontle	18° 50' 49.11"	98° 25' 21.24"	Raíz, tallo, hoja, flor

Elaboración propia a partir de datos de campo

Las muestras se colocaron en bolsas de papel estraza y rotuladas para su traslado a laboratorio. Se lavaron con agua destilada y se colocaron en la estufa de secado a una temperatura de 70°C. Posteriormente, el material fue molido con un molino de acero inoxidable con la finalidad de tener muestras homogéneas para facilitar el proceso de análisis. En la Figura 25 se muestra el proceso realizado y en la figura 26 se observan las muestras listas para su análisis.

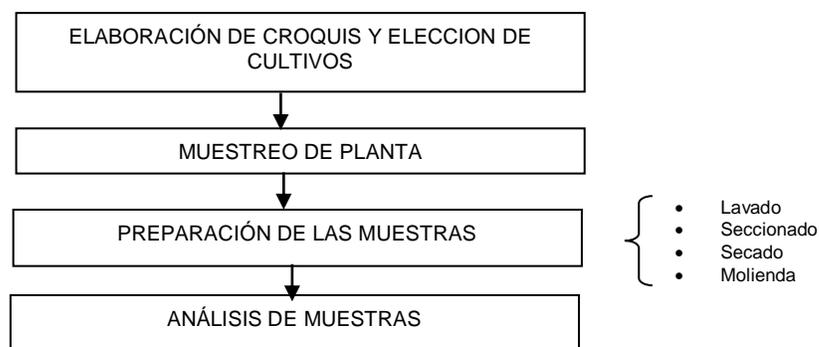


Figura 25. Proceso de muestreo de planta



Figura 26. Muestras preparadas para su análisis

Fuente: Olvera B. I. 2015

#### 4.2.1.5 Organización y análisis de la información

La información se generó a partir del análisis de laboratorio con 6 muestras compuestas de agua provenientes de 3 puntos de interés, 2 muestras compuestas de suelo, 12 muestras compuestas de tejido vegetal de tres cultivos de la región. A continuación se describe el tratamiento que se le dio a la información recabada.

##### 4.2.1.5.1 Calidad del agua

Para la determinación de la calidad de agua de riego se utilizó la metodología sugerida por Palacios y Aceves (1994) para el cálculo de los siguientes índices:

##### Salinidad Efectiva

Si  $Ca > CO_3 + HCO_3 + SO_4$

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3 + HCO_3 + SO_4) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Si  $Ca < CO_3 + HCO_3 + SO_4$

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - Ca \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Si  $Ca < CO_3 + HCO_3$ ; pero  $Ca + Mg > CO_3 + HCO_3$ ; entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - (CO_3 + HCO_3) \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Si  $Ca + Mg < CO_3 + HCO_3$ ; entonces:

$$SE = \text{Suma de cationes}^* - (Ca + Mg) \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Donde:

SE= Salinidad efectiva

Ca= Calcio

Mg= Magnesio

CO<sub>3</sub>= Carbonatos

HCO<sub>3</sub>= Bicarbonatos

SO<sub>4</sub>= Sulfatos

\*=Si la suma de cationes es menor que la de aniones, deberá emplearse la suma de aniones en lugar de la de cationes.

### Salinidad Potencial

$$SP = Cl + \frac{1}{2} SO_4 \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

SP= Salinidad Potencial

Cl= Cloro

SO<sub>4</sub> = Sulfatos

### Relación de Absorción de Sodio

$$RAS = Na / \sqrt{[(Ca + Mg) / 2]} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde

RAS= Relación de Absorción de Sodio

Na= Sodio

Ca= Calcio

Mg= Magnesio

### Carbonato de Sodio Residual

$$CSR = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg) \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde:

CSR=Carbonato de Sodio Residual

CO<sub>3</sub>= Carbonatos

HCO<sub>3</sub>= Bicarbonatos

Ca= Calcio

Mg= Magnesio

### Porcentaje de Sodio Posible

$$\text{PSP} = (\text{Na} / \text{SE}) * 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde

PSP= Porcentaje de Sodio Posible

Na= Sodio

SE= Salinidad Efectiva

De acuerdo a Palacios & Aceves (1994), los índices calculados pueden clasificar al agua de riego de acuerdo a su valor, como buena, condicionada y no recomendable. Por su parte, Richards (1954) ha construido un nomograma que permite la clasificación del agua de riego de acuerdo a los índices CE y RAS. Siguiendo estos criterios, se realizó la clasificación de la calidad utilizando los valores analíticos directos de cada uno de los parámetros utilizados.

Para tener otro referente de la calidad del agua, se determinaron parámetros como la DBO<sub>5</sub>, pH y metales pesados; se elaboró una tabla comparativa con los índices y su estado con respecto a la normatividad nacional e internacional.

#### **4.2.1.5.2 Calidad del suelo**

Los datos resultantes del análisis de suelo para parámetros de pH, C.E y M. O., fueron contrastados con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo.

Las concentraciones de Pb, Cd y Ni cuantificados en las muestras se compararon con la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio, la normatividad establecida por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME) y los parámetros establecidos por Kabata-Pendias (2011).

#### **4.2.1.5.3 Calidad de la planta**

Los resultados sobre trazas de metales pesados en planta se compararon con los límites permisibles que establece Kabata-Pendias (2011) y se determinó la toxicidad.

### **4.2.2 Enfoque social**

#### **4.2.2.1 Técnicas de investigación**

Para generar información se utilizaron tres técnicas: recorridos de campo, observación directa y la encuesta mediante cuestionarios estructurados aplicados a los productores usuarios del agua tratada, para conocer su percepción sobre el efecto del agua tratada en sus cultivos, en el suelo y su salud. El cuestionario permitió obtener la información para conocer la magnitud del fenómeno social, y cómo o por qué ocurre (Martínez, 2002).

Además permitió recabar información referente al uso de la tierra, los recursos hídricos usados, los cultivos que practican y la opinión que tienen respecto a los efectos del agua proveniente de la PTAR (agua tratada).

El tamaño de muestra se calculó mediante un muestreo aleatorio simple con varianza máxima mediante la siguiente ecuación (Taborga *et. al.*, 2011):

$$n = (NZ_{\alpha/2}^2(0.25))/(Nd^2 + Z_{\alpha/2}^2(0.25)) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

n= Tamaño de muestra

N= Tamaño de la población= 100

$Z_{\alpha/2}^2$  = Confiabilidad, se utilizó  $\alpha=0.05= 1.96^2= 3.8416$

pq=0.25

$d^2$  =Error estándar, se utilizó 10% =  $(0.10)^2=0.01$

Sustituyendo valores en ecuación 6 se obtiene:

$$n = \frac{100 * 3.8416 * 0.25}{(100 * 0.01) + ((3.8416) * (0.25))} = \frac{96.04}{1.9604} = 48.99 = 49$$

El resultado fue 49, por lo que se aplicó el cuestionario a 49 usuarios del agua tratada.

#### **4.2.2.2 Organización y análisis de la información**

La información recabada en los cuestionarios se organizó en una base de datos en Excel y se analizó con el programa SPSS (Statistical Package for Social Sciences) (Castañeda, 2010), donde se generaron gráficas y tablas descriptivas y se contrastó la hipótesis específica referente a la percepción social mediante pruebas de Chi cuadrado de las variables: contaminación del agua, cambios en suelo, favorecimiento en cultivos, malestares al usar agua residual tratada, con respecto a la edad, escolaridad y la superficie que poseen los productores.

## **CAPÍTULO V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se analizan y discuten los resultados derivados del análisis técnico y social. Primeramente se presentan los resultados de la calidad de agua, suelo y planta, posteriormente se analizan de los resultados sobre la percepción de los productores usuarios del agua tratada.

### **5.1 Calidad del agua**

La calidad del agua es un parámetro importante que afecta a todos los aspectos de los ecosistemas y del bienestar humano, como la salud de una comunidad, el alimento que se ha de producir, las actividades económicas, la salud de los ecosistemas y la diversidad biológica (ONU-AGUA, 2010) y se refiere a su composición y la medida en que es afectada por la concentración de sustancias producidas por procesos naturales y antrópicos (Severiche & Barreto, 2014), se determina comparando las características físicas y químicas de una muestra de agua con unas directrices de calidad del agua o estándares (WHO, 2013).

Para conocer la calidad del agua procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Atlixco, se realizaron las determinaciones de algunos parámetros fisicoquímicos claves. En el Cuadro 10 se presenta una comparación de los parámetros analizados: potencial hidrogeno (pH); Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>); plomo (Pb); cadmio (Cd) y níquel (Ni), con las directrices de organismos internacionales como el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME, 2014), Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 2016), Unión Europea (UE, 2014) y la Norma Oficial Mexicana NOM-001, con estándares aplicables a agua procedente de efluentes de tratamiento, donde se observa que los parámetros analizados al agua de la PTAR de Atlixco se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos por la Norma Oficial Mexicana e incluso que las normas internacionales.

Cuadro 10. Comparación de parámetros analizados con normatividad nacional e internacional

Directrices/Normas	pH	DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Pb (mg L <sup>-1</sup> )	Cd (mg L <sup>-1</sup> )	Ni (mg L <sup>-1</sup> )
CCME	---	---	0.2	0.01	0.2
EPA	6—9	30	0.2	0.01	0.2
U E	---	30	---	---	---
NOM-MX		75	0.5	0.2	2
IM1 <sup>1</sup>	8.02	269.87	---	---	---
IM2 <sup>2</sup>	8.87	287.82	0.046	n/d	0.034
EM1 <sup>3</sup>	7.64	25.1	---	---	---
EM2 <sup>4</sup>	8.7	21.47	0.005	n/d	0.027
CPM1 <sup>5</sup>	7.49	28.04	---	---	---
CPM2 <sup>6</sup>	8.23	13.04	0.036	n/d	0.013

<sup>1</sup>IM1= Influyente muestreo 1, <sup>2</sup>IM2= Influyente muestreo 2, <sup>3</sup>EM1= Efluente muestreo 1, <sup>4</sup>EM2= Efluente muestreo 2, <sup>5</sup>CPM1= Compuerta "El potrero" muestreo 1, <sup>6</sup>CPM2= Compuerta "El potrero" muestreo 2

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CCME, EPA, UE, NOM\_MX, Análisis de laboratorio

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) es el parámetro que mide el contenido de materia orgánica biodegradable que posee un cuerpo de agua, y la cantidad de oxígeno necesaria para su descomposición, expresa la degradación de contaminantes dentro de un lapso de 5 días que realizan los microbios aerobios y para la cual consumen oxígeno disuelto en el agua (Geissler & Arrollo, 2011).

Cuando se descargan aguas con DBO<sub>5</sub> alta a un cuerpo de agua, las bacterias y otros microorganismos disponen de una rica fuente de alimento, lo que permite que se reproduzcan con rapidez. Las cantidades cada vez mayores de bacterias, consumen el oxígeno del agua. Los valores por encima de 30 mg L<sup>-1</sup> pueden ser indicativos de contaminación en aguas anteriores (Marín & Osés, 2013).

En la Figura 27, se observan los valores de DBO<sub>5</sub>, antes del proceso de tratamiento, mostrando una alta concentración, tras el tratamiento los valores disminuyen a niveles aceptables aplicables a la norma nacional, incluso a normas internacionales como la EPA y UE.

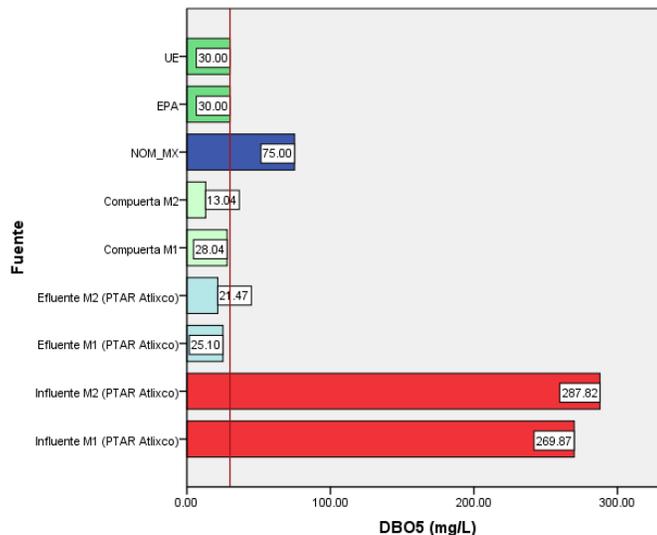


Figura 27. Resultados de DBO<sub>5</sub> comparado con la Norma Oficial Mexicana y Normas Internacionales

En el caso de metales pesados analizados en este estudio, el cadmio no fue detectado en agua, plomo y níquel en pequeñas proporciones, muy por debajo de la normatividad nacional e internacional (Figuras 28 y 39), estos resultados son similares a los reportados por Pérez *et al.* (2016), en un estudio realizado en Saltillo, Coahuila en una planta de tratamiento de agua residual de origen doméstico.

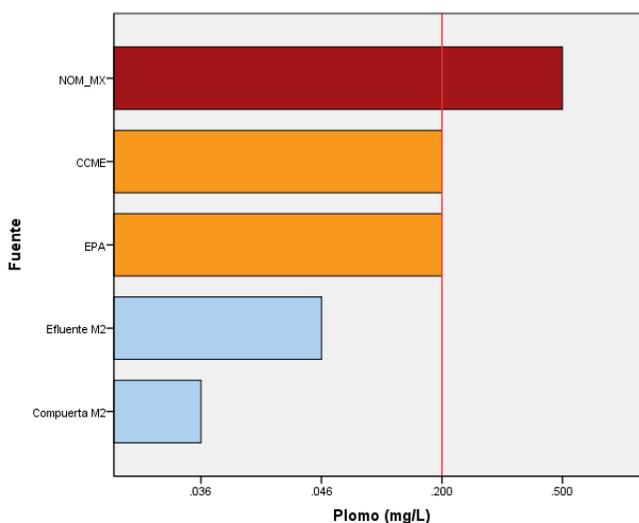


Figura 28. Contenido de Pb en efluente y punto de riego, en comparación con normatividad nacional e internacional

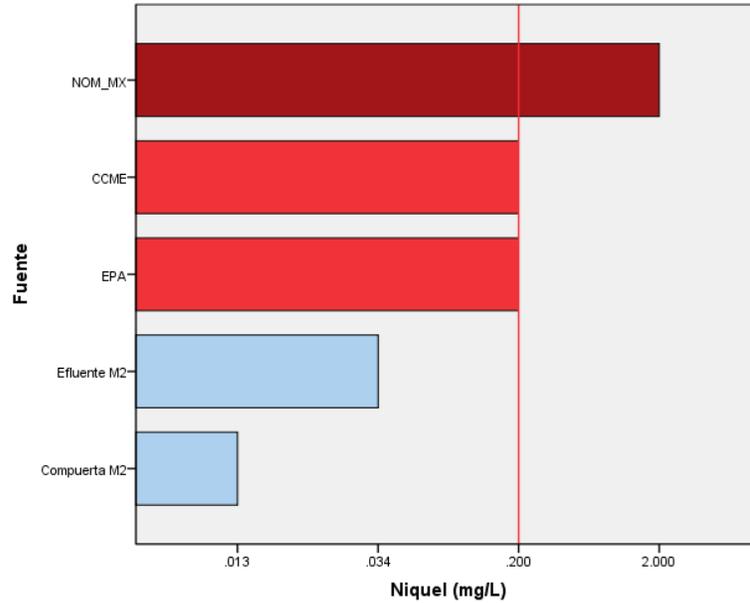


Figura 29. Contenido de Ni en efluente y punto de riego, en comparación con normatividad nacional e internacional

### 5.1.1 Calidad agronómica del agua

Se presentan los resultados de los dos muestreos de agua residual y residual tratada y su caracterización referente a calidad para riego agrícola. Se analizan las determinaciones realizadas a los tres puntos de muestreo (Influente (I), Efluente (E) y Compuerta “El Potrero” (CP) con relación a su calidad agronómica<sup>7</sup>, donde se cuantificó la concentración de cationes y aniones, para determinar los índices propuestos por Palacios & Aceves (1994), que son: contenido de sales solubles: Conductividad Eléctrica (CE), Sodio Posible (SP), Salinidad Efectiva (SE), efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo: Relación de Adsorción de Sodio (RAS), Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Porcentaje de Sodio Posible (PSP).

<sup>7</sup> Definimos como calidad agronómica del agua al conjunto de características fisicoquímicas que definen su adecuado uso en la agricultura.

## Primer muestreo

Como resultado del primer muestreo y su análisis, se obtuvieron los valores que caracterizan a las aguas como condicionadas para uso agrícola (Cuadro 11).

Cuadro 11. Parámetros fisicoquímicos primer muestreo (abril 2015)

Parámetro	Muestreo 1		
	I	E	CP
CE $\mu\text{mhos cm}^{-1}$	1030	960	780
pH (Unidades)	8.02	7.64	7.49
Ca <sup>2+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	4.24	4.06	2.86
Mg <sup>2+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	1.93	1.29	1.85
K <sup>+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	0.5	0.45	0.27
Na <sup>+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	3.17	4.04	2.9
$\Sigma$ cationes	9.84	9.84	7.88
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	1.24	0.5	0.25
Cl <sup>-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	2.17	2.39	1.18
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	4.97	4.44	3.77
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	1.86	1.51	1.31
$\Sigma$ aniones (me L <sup>-1</sup> )	10.24	8.84	6.51
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (%)	60.64	55.88	61.69
SP	3.09	1.51	1.83
RAS	1.8	2.46	1.88
SE	4.07	3.49	1.79
PSP	77.95	115.76	161.5
CSR	0.04	-0.41 ~0	0.70
RAS & CE	C3 S1	C3 S1	C3 S1
Clasificación del agua para riego	Condicionada	Condicionada	Condicionada

\* Cuando la diferencia es negativa, no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a 0  
I: Influyente; E: Efluente; CP: Compuerta el Potrero

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de laboratorio

Los datos del cuadro anterior muestran una tendencia descendente en la conductividad eléctrica, observando el valor más alto en el influente y el más bajo en el punto de riego, pese a ello los valores resultantes son indicativos de problemas de salinidad.

El pH del influente es de 8.02 al tercer punto muestreado disminuye, con una tendencia a la neutralidad, en el caso específico del agua de riego fluctúa entre 6.5 y 8.4.

Algunos factores como el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  presentan concentraciones descendentes del influente al punto de riego; el  $\text{Mg}^{2+}$  tuvo un comportamiento distinto, en el influente se encuentra la mayor concentración y la menor en el efluente de la PTAR, en el punto de riego aumenta nuevamente; el  $\text{Na}^+$  presenta la mayor concentración posterior al tratamiento del agua y disminuye en el punto de riego, como se muestra en la Figura 30.

En el caso de los aniones  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  los resultados obtenidos muestran que la concentración disminuye posterior al tratamiento del agua residual, encontrándose el valor más bajo en el punto de riego. En  $\text{Cl}^-$  se observa el valor más alto en el efluente de la PTAR, esto se atribuye a que la etapa final del proceso de tratamiento es la cloración (Figura 30).

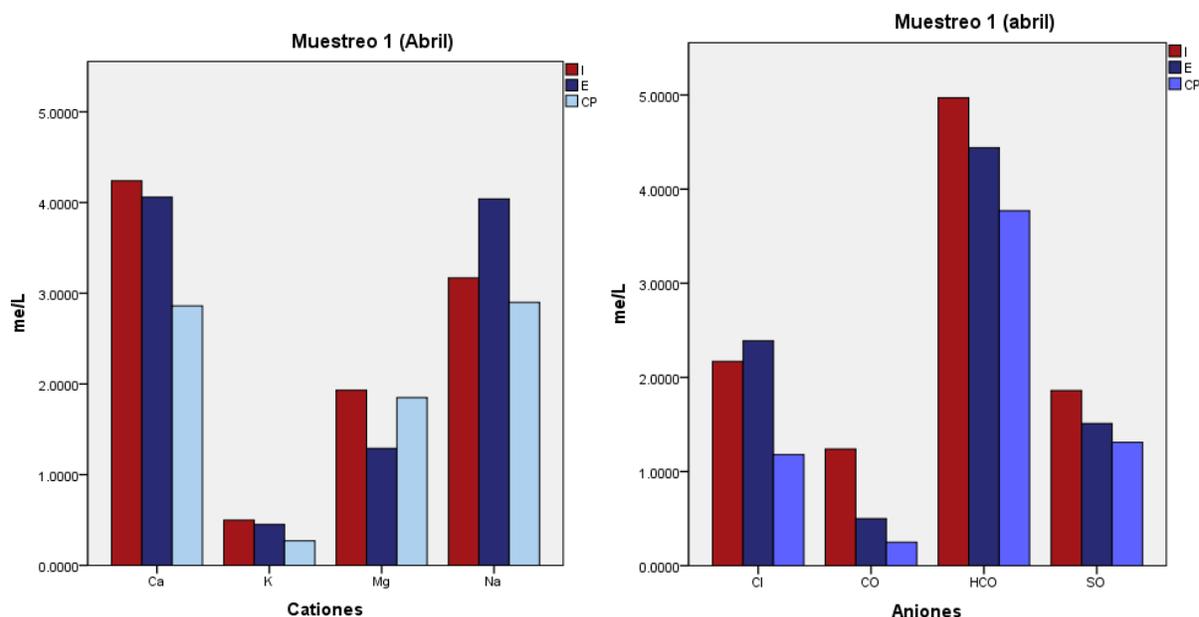


Figura 30. Iones primer muestreo, abril 2015

Con los resultados obtenidos se determinaron los factores de salinidad con la finalidad de clasificar el agua de riego con base en la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), para los tres puntos muestreados se registró una clasificación C3-S1.

Según Palacios & Aceves (1994), el agua de tipo C3 es un agua de salinidad alta. No puede usarse en suelos con drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas especiales para el control de la salinidad, debiéndose seleccionar plantas muy tolerantes a las sales. La conductividad está comprendida entre 750 y 2250  $\mu\text{mhos cm}^{-1}$  a 25 °C. Los resultados obtenidos en los tres puntos muestreados se encuentran en este lo que indica que el agua presenta salinidad alta.

La clasificación S1 es un indicativo de agua con bajo contenido en sodio. Los valores de RAS recomendados están comprendidos entre 0 y 10, pueden usarse para el riego en la mayoría de los suelos con pocas posibilidades de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Con respecto a los valores de SP la calidad del agua en el influente es “Condicionada” y para el efluente y punto de riego es “buena”, SE para el efluente e influente es condicionada y para el punto de riego es buena, RAS es bajo para los tres puntos de muestreo, CSR es bueno para los tres puntos, PSP y Cl<sup>-</sup> los valores obtenidos clasifican al agua como condicionada.

## Segundo muestreo

Los resultados de los parámetros del segundo muestreo se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Parámetros fisicoquímicos segundo muestreo (septiembre 2015)

Parámetro	Muestreo 2		
	I	E	CP
CE $\mu\text{mhos cm}^{-1}$	1040	900	360
pH (Unidades)	8.87	8.7	8.23

Ca <sup>2+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	2.17	1.98	0.98
Mg <sup>2+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	3.49	3.2	1.64
K <sup>+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	0.16	0.13	0.03
Na <sup>+</sup> (me L <sup>-1</sup> )	3.5	3.15	1.28
∑ cationes	9.32	8.46	3.93
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	0	0	0
Cl <sup>-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	2.51	2.26	3.1
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	7.52	5.83	0.75
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (me L <sup>-1</sup> )	0.44	0.21	0.02
∑ aniones (me L <sup>-1</sup> )	10.48	8.38	3.87
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (%)	39.8	47.35	73.23
SP	2.73	2.36	0.76
RAS	2.08	1.95	1.12
SE	4.81	3.11	1.25
PSP	72.70	101.29	102.1
CSR	1.86	0.64	0.48
RAS & CE	C3 S1	C3 S1	C2 S1
Clasificación del agua para riego	Condicionada	Condicionada	Condicionada

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de laboratorio

La conductividad eléctrica muestra una tendencia descendente, observando el valor más alto en el influente (1,040  $\mu\text{mhos cm}^{-1}$ ) y el más bajo en el punto de riego (360  $\mu\text{mhos cm}^{-1}$ ), esto se debe a que las sales disueltas también sufren un decremento ya que la conductividad eléctrica es un parámetro regido por el contenido de sales (Alcántar *et al.*, 1992), cabe mencionar que el agua recorre alrededor de 4 km para llegar a la primera compuerta, por lo que los decrementos obedecen a los procesos de autodepuración, que es un conjunto de fenómenos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar en el curso del agua de modo natural y que provocan la destrucción de materias extrañas incorporadas a un cuerpo de agua (Tirado *et al.*, 2016).

El pH del influente es de 8.87 al tercer punto muestreado disminuye, con una tendencia a la neutralidad.

En relación a los cationes Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> y Na<sup>+</sup>, en el influente se encuentra la mayor concentración y la menor en el punto de riego (Figura 31), a consecuencia del

proceso de autodepuración, añadiendo que las plantas acuáticas con que interacciona el agua absorben algunos componentes en forma de nutrientes, por ello se observa un decremento de estos iones (Tirado *et al.*, 2016).

En el caso de los aniones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  los resultados obtenidos muestran que la concentración disminuye posterior al tratamiento del agua residual, no se registró presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ ; el valor más alto de  $\text{Cl}^-$  se presenta en el punto de riego a diferencia del primer muestreo como puede observarse en la figura 31.

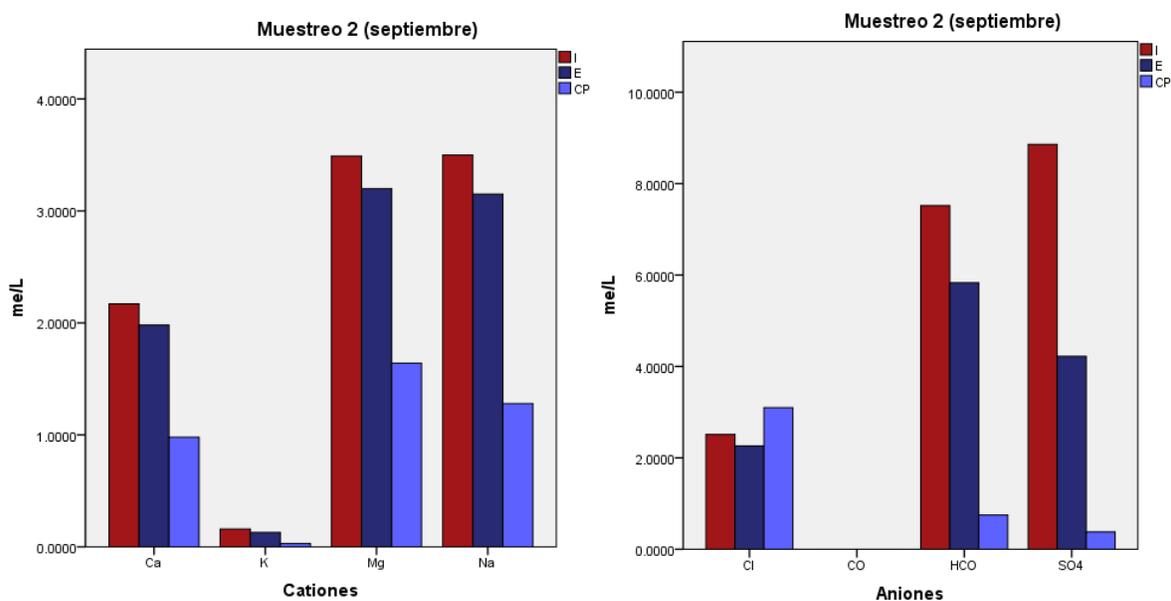


Figura 31. Iones segundo muestreo, septiembre 2015

El influente y efluente presentan una calidad C3-S1 (valores de C. E. en influente de  $1040 \mu\text{mhos cm}^{-1}$  y efluente 900, agua con salinidad alta), en el punto de riego cambia a C2-S1; el agua de tipo C2 es considerada agua de salinidad media, puede usarse normalmente siempre que exista un grado moderado de lavado. Se puede utilizar para cultivos moderadamente tolerantes a las sales sin que exista peligro de salinización. La conductividad está comprendida entre  $250$  y  $750 \mu\text{mhos cm}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ , en los tres puntos se encuentran con bajo contenido de sodio.

En ambos muestreos los resultados obtenidos en efluente son similares a los reportados por Rodríguez *et al.* (2009), en un estudio realizado en San Luis Potosí a plantas de tratamiento de aguas residuales de origen urbano, al igual a los encontrados por Pérez *et al.* (2016), donde los valores de RAS indican que el agua no muestra riesgo de sodicidad. Mientras que los índices de CE, SE, SP, CSR y RAS son más elevados que los encontrados en el presente estudio.

La hipótesis específica número 1 señala: **“La calidad del agua proveniente de la planta tratadora de agua residual Atlixco cumple con la normatividad oficial para su aprovechamiento en riego agrícola”**. Para probar esta aseveración se analizaron con anterioridad indicadores de calidad del agua y calidad agronómica del agua, en tres puntos estratégicos para conocer el recorrido del recurso hídrico desde que ingresa al proceso de saneamiento y hasta el punto donde se dirige a los campos de cultivo.

De acuerdo al análisis de calidad del agua, específicamente para efluentes de plantas de tratamiento, se observa que cumple con la normatividad oficial tanto nacional como internacional en los parámetros analizados.

Respecto a la calidad agronómica se observar que el agua tiene una calidad condicionada para su uso en cultivos agrícolas en los tres puntos muestreados. Se debe considerar que en cada riego se están incorporando sales al suelo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se calcularon las sales totales (ST) incorporadas al suelo. Considerando que cada mm de riego equivale a  $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  o  $10,000 \text{ L ha}^{-1}$  (Prieto, 2008), se multiplico las sales totales por la cantidad de agua de riego como se observa en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Salinidad potencial

		Cationes (mg/L)		Aniones (mg/L)	
Muestreo 1	Ca <sup>2+</sup>	57.2	Cl <sup>-</sup>	42	
	Mg <sup>2+</sup>	22.5	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	305	
	Na <sup>+</sup>	66.6	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	62.8	
	Suma	146.3		409.8	
	Sales totales	556.1	mg L <sup>-1</sup>		
		0.5561	g L <sup>-1</sup>		
Sales incorporadas= ST*R		5,561 g ha <sup>-1</sup>	5.561 kg ha <sup>-1</sup>		
		Cationes (mg/L)		Aniones (mg/L)	
Muestreo 2	Ca <sup>2+</sup>	19.63	Cl <sup>-</sup>	26.786	
	Mg <sup>2+</sup>	19.934	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	251.524	
	Na <sup>+</sup>	29.503	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.912	
	Suma	69.067		279.22	
	Sales totales	348.28	mg L <sup>-1</sup>		
		0.34828	g L <sup>-1</sup>		
Sales incorporadas= ST*R		3,4828 g ha <sup>-1</sup>	3.4828 kg ha <sup>-1</sup>		

Fuente: Elaboración propia

Para el primer muestreo, por cada riego se adicionan al suelo 5.561 kg ha<sup>-1</sup> de sales, en el segundo muestro 3.656 kg ha<sup>-1</sup> en apariencia podría decirse que es pequeña la cantidad. Por citar un ejemplo, el maíz requiere una lámina de riego neta de 670 mm (CONAGUA, 2015), se estima un total de 3.7 y 2.3 toneladas por hectárea respectivamente de acumulación de sales, esto pone en evidencia que los riesgos de salinización del suelo a mediano plazo son alarmantes, por lo que la hipótesis no se acepta.

## 5.2 Efecto suelo - planta por el uso de agua tratada

El riego con agua de alta concentración iónica conduce a la salinización progresiva de los suelos, sin embargo, la acumulación de sales dependerá de las propiedades físicas y químicas del suelo. Castellanos *et al.* (2000) mencionan que el problema de salinidad se restringe a regiones con baja precipitación pluvial (< 350

mm), tal es el caso de las zonas áridas y semiáridas. Por su parte, Argentel *et al.* (2006) indican que la salinidad de los suelos afecta el rendimiento de los cultivos, concluyendo que el incremento en la concentración salina disminuye el crecimiento de los cultivos; al respecto, Can *et al.* (2014) encontraron que el daño por salinidad depende de la concentración y tipo de sales, además de la variedad de cultivo. En tanto que Sánchez *et al.* (2013) consideran que dependerá de la tolerancia de un determinado cultivo a niveles extremos de concentración iónica.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del muestreo de suelo y de plantas irrigados con agua residual tratada.

### 5.2.1 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo en las dos parcelas muestreadas de la comunidad de Santa Ana Coatepec regadas con agua del canal principal, que recibe agua residual tratada, se presentan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Propiedades químicas de las parcelas estudiadas

Ubicación	Unidades pH	dS/m CE	% M. O.
Sitio 1 predio del Sr. Fortunato Munive	7.49	4.458	0.891
Sitio 2 predio de la Sra. Petra Domínguez	6.21	0.978	2.167

Fuente: Análisis de laboratorio

Para analizar los resultados del cuadro anterior se tomaron como referente los valores establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 en cuanto a las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis (Cuadro 15).

Cuadro 15. Parámetros químicos establecidos en suelo NOM-021-SEMARNAT-2000

Parámetros					
pH (unidades)	Fuertemente ácido (<5)	Moderadamente ácido (5.1-6.5)	Neutro (6.6-7.3)	Medianamente alcalino (7.4-8.4)	Fuertemente Alcalino (>8.5)
C.E. (dSm <sup>-1</sup> )	Efectos despreciable de salinidad (<1)	Ligeramente salino (1.1-2.0)	Moderadamente salino (2.1-4.0)	Suelo salino (4.1-8.0)	Fuertemente salino (8.1-16.0)
M. O. (%)	Muy bajo (<0.5)	Bajo (0.6-1.5)	Medio (1.6-3.5)	Alto (3.6-6.0)	>6

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000

El sitio 1 (Ubicación: N 18° 50' 48.16", W 98° 25' 21.31") es suelo medianamente alcalino, salino y con un porcentaje de materia orgánica bajo; por el contrario el sitio 2 (Ubicación: N 18° 50' 54.19", W 98° 25' 26.58") presenta un suelo moderadamente ácido, con efectos no apreciables de salinidad y con un porcentaje medio de materia orgánica. Al ser suelos con bajo contenido de materia orgánica el pH es neutro o muy cercano a la neutralidad (Nguyễn *et al.*, 2008).

### 5.2.2 Contenido de metales pesados disponibles en suelo

Los metales pesados se encuentran en el suelo de manera natural en pequeñas concentraciones, no obstante la actividad humana incrementa el contenido de estos de manera considerable; la actividad minera, industrial, doméstica, rellenos sanitarios, drenaje pluvial y quema de combustible constituyen en las mayores fuentes de contaminación por metales pesados (Jáuregui *et al.*, 2012).

La cantidad de metales pesados en el suelo está en función de sus propiedades químicas (pH, contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, entre otras) (Sauve *et al.*, 2000).

Los metales pesados contribuyen de manera considerable a la contaminación ambiental debido a que no son biodegradables ni termodegradables, generalmente la no percolación a las capas inferiores de los suelos pueden acumularse a concentraciones tóxicas para las plantas y animales (Prieto *et al.*, 2009).

El cuadro 16 se muestra las concentración obtenidas de los metales pesados Pb, Cd y Ni para los sitios objeto de estudio, en comparación con la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la normatividad establecida por el Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente y los parámetros que establece Kabata-Pendias (2011).

Cuadro 16. Concentración de metales pesados en suelo y su comparación con la normatividad vigente, nacional e internacional.

Ubicación	mg Kg <sup>-1</sup>		
	Cd	Ni	Pb
Sitio 1 predio del Sr. Fortunato Munive	0.002	0.843	0.036
Sitio 2 predio de la Sra. Petra Domínguez	0.056	1.454	0.125
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	47	1600	400
CCME	1.4	45	-
Kabata-Pendias (2011)	Marginal	Marginal	Marginal
	0.06-1.1	4-15	20
	Peligroso	Peligroso	Peligroso
	1.1-5	>15	100-500

Como se puede apreciar las concentraciones de los metales pesados son inferiores a los que establecen las directrices naciones e inclusive las internacionales, esto obedece a que los suelos contienen bajo contenido de materia orgánica, que favorece los mecanismos de absorción, aunado al pH que es muy cercano a la neutralidad (Julca *et al.*, 2006; Violante *et al.*, 2010). Sin embargo al estar presentes pueden acumularse en el suelo, como lo demuestra el estudio realizado por Guadarrama & Galvan (2015), luego ser absorbidos por las plantas y pasar por los animales y al ser humano.

La hipótesis específica 2, señala: **“El uso de agua residual tratada mejora la calidad del suelo agrícola”**. El suelo presenta problemas de salinidad y bajo

contenido de materia orgánica, efecto del riego con agua de elevados índices de salinidad. Las concentraciones de metales pesados (Pb, Cd y Ni), son bajas, por lo que la hipótesis no se acepta.

### 5.2.3 Concentración de metales pesados en cultivos

Las plantas pueden acumular metales pesados dentro de sus tejidos, pueden ser receptores pasivos, pero también ejercen un control sobre la absorción o rechazo de algunos elementos por medio de reacciones fisiológicas apropiadas.

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta (Méndez *et al.*, 2009).

En este estudio se determinó la concentración de metales pesados en tejido vegetal, los resultados se presentan el Cuadro 17.

Cuadro 17. Concentración de metales pesados (Pb,Ni), en tejido vegetal de calabacita, huauzontle y té limón

Metal traza	Kabata-Pendias (2011)		Cultivos		
			calabacita	huauzontle	te limón
Plomo (Pb) mg Kg <sup>-1</sup>	0 Deficiente 0.5-10 Tolerable 30-300 Tóxico	Raíz	3.493	3.056	4.807
		Tallo	0.29	0.01	0.309
		Hoja	2.176	1.152	3.396
		Flor	3.126	3.056	-
		Fruto	3.036	-	-
Níquel (Ni) mg Kg <sup>-1</sup>	0 Deficiente 1-10 Tolerable 10-100 Tóxico	Raíz	28.648	62.124	27.237
		Tallo	30.827	8.9	25.211
		Hoja	24.729	3.75	26.89
		Flor	58.489	9.038	-
		Fruto	11.719	-	-

Fuente: Elaboración propia a partir de análisis de laboratorio y datos Kabata- Pendias (2011).

En el caso de calabacita (*Cucurbita pepo*) el contenido de plomo se encuentra dentro de parámetros tolerables establecidos por Kabata-Pendias (2011), como se muestra en la Figura 32.

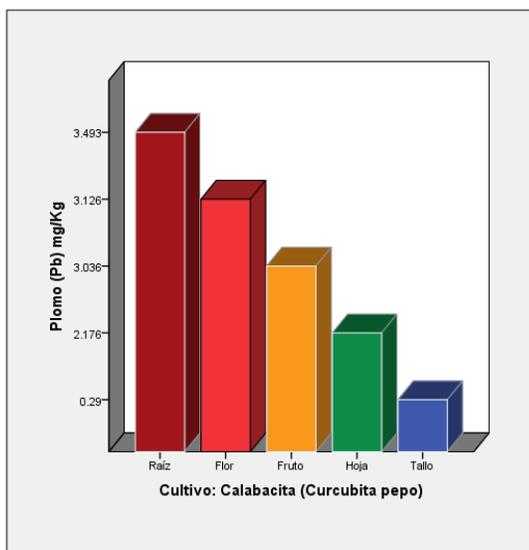


Figura 32. Concentración de plomo (Pb) en materia seca en calabacita (*Cucurbita pepo*)

En relación a la concentración de níquel se observa que el valor más alto se localiza en niveles tóxicos, encontrándose en flor que es una de las partes comestibles; sin embargo, está presente en toda la planta en concentraciones tóxicas (Figura 33).

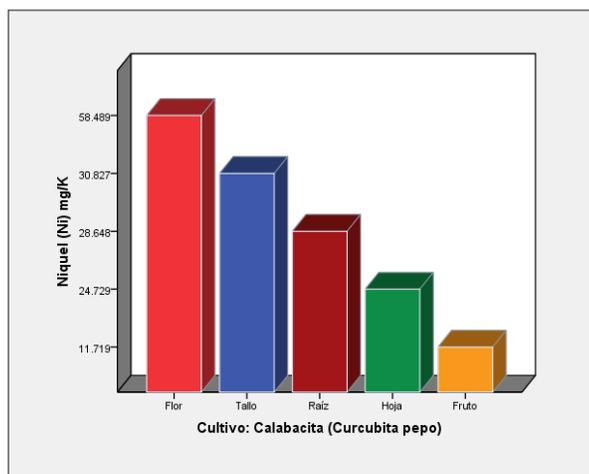


Figura 33. Concentración de níquel (Ni) en materia seca en calabacita (*Cucurbita pepo*)

En el cultivo de huauzontle (*Chenopodium nuttalliae*), el contenido de plomo se encuentra en valores tolerables (Kabata–Pendias, 2011), cabe mencionar que de acuerdo al análisis realizado la parte comestible de la planta (flor), es donde se detectó el contenido más alto de este elemento traza (Figura 34).

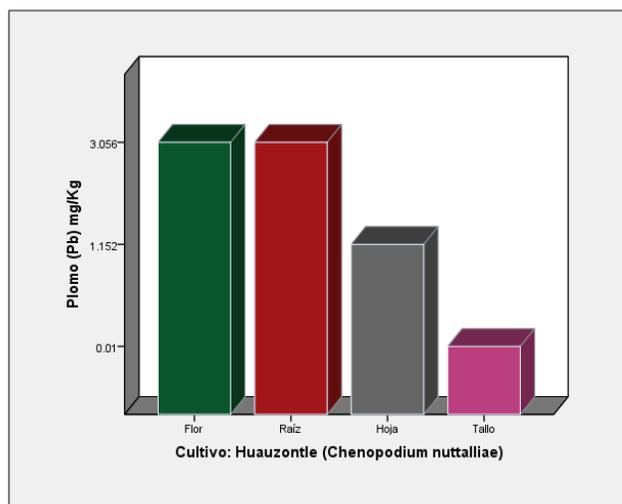


Figura 34. Concentración de plomo (Pb) en materia seca en huauzontle (*Chenopodium nuttalliae*)

En contenidos de níquel, la parte comestible se encuentra en valores tolerables de acuerdo a Kabata-Pendias (2011), y en raíz se localizó la mayor concentración de este elemento traza (Figura 35).

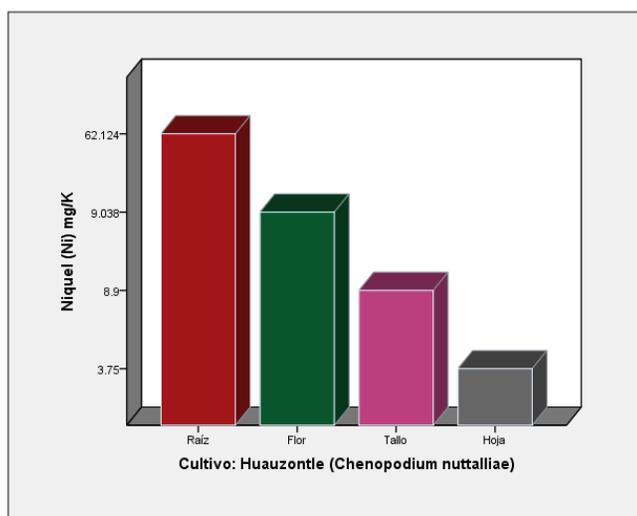


Figura 35. Concentración de níquel (Ni) en materia seca en huauzontle (*Chenopodium nuttalliae*)

Para el caso del cultivo té limón (*Cymbopogon citratus*), la concentración de plomo en toda la planta se encuentra dentro de límites tolerables (Figura 36), sin embargo en el caso de níquel (Figura 37) presenta niveles de toxicidad con referencia a los parámetros propuestos por Kabata-Pendias (2011).

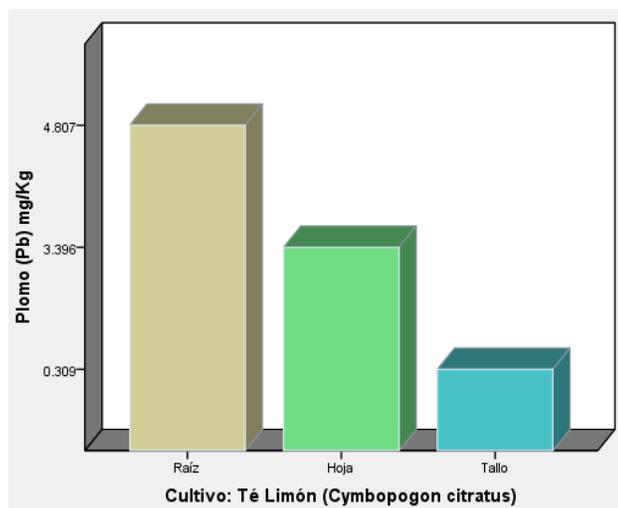


Figura 36. Concentración de plomo (Pb) en materia seca en té limón (*Cymbopogon citratus*)

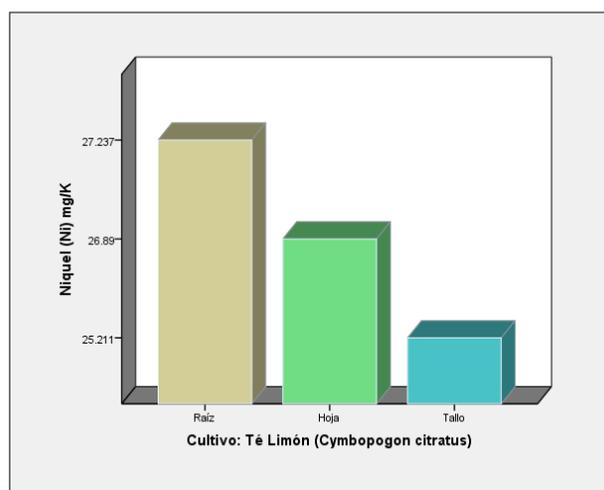


Figura 37. Concentración de níquel (Ni) en materia seca en té limón (*Cymbopogon citratus*)

Las plantas tienen la capacidad de absorber o incluir dentro de sus órganos sustancias o elementos químicos de la naturaleza, de los cuales muchos de ellos son

beneficiosos para su subsistencia y otros son perjudiciales para sus procesos fisiológicos como los metales pesados; sin embargo, esta acumulación en distinto grado, depende de la especie vegetal, de las características y concentración de los metales en el suelo (Roncal citado en Padilla *et al.*, 2015). Los resultados del presente estudio relacionados con la absorción de metales pesados por plantas, concuerdan con lo mencionado por Padilla *et al.* (2015), las plantas más expuestas, son aquellas que poseen un tallo corto, como es el caso de las hortalizas (en este estudio la calabacita), las cuales no alcanzan el metro de altura lo que las hace más susceptibles a la absorción de estos metales,

La hipótesis específica 3, señala: **“No existe presencia de metales pesados (Pb, Cd, Ni) en cultivos que usan aguas tratadas”**. Al realizar el análisis de la posible presencia de trazas de metales pesados (Pb, Cd, Ni), los resultados evidencian la presencia de Pb en los tres cultivos, las concentraciones determinadas se encuentran en niveles tolerables para la planta, caso contrario para Ni, que se encuentra en concentraciones tóxicas, por lo que la hipótesis no se acepta.

### **5.3 Percepción de los productores respecto a los efectos del agua residual tratada por la PTAR Atlixco**

La calidad del agua es una construcción social que depende de los usos y valores atribuidos al líquido (WRI, 2000), los cuales, a su vez, influyen en la percepción de los usuarios.

El concepto de percepción, desde que se produjo el primer trabajo experimental sobre la fisiología de los sentidos, en los inicios del siglo XIX, ha evolucionado gracias a las reflexiones de varios filósofos como Maurice Merleau-Ponty y a varias corrientes dentro de la psicología y otras disciplinas, como la antropología y la geografía, que centraron sus estudios en el proceso perceptivo. Se trata de una comprensión holística de la relación ser humano-ambiente. En el proceso de la percepción están involucrados mecanismos vivenciales que implican tanto al ámbito

consciente como al inconsciente de la psique humana. Las percepciones deben ser entendidas como relativas a la situación histórico-social, pues tienen una ubicación espacial y temporal, y dependen de las circunstancias cambiantes que influyen en el proceso perceptivo, modificándolo y adecuándolo a las condiciones (Benez *et al.*, 2009).

Con base en los elementos anteriores se estudió la percepción de los productores respecto a los efectos del agua tratada aplicada en suelo y cultivos agrícolas y en su salud. Se planteó como hipótesis que **“El uso de aguas tratadas beneficia al suelo y a los cultivos y no ocasiona problemas a la salud de acuerdo a la percepción de los productores”**.

### **5.3.1 Características de los productores**

Los resultados de una muestra de 49 productores usuarios del agua residual tratada, revelan los siguientes datos:

**Edad y género.** La edad promedio de los productores fue de 54 años, con una mínima de 22 y una máxima de 82, presentando una mediana de 56.5 años. Más de la mitad (65.3%) tienen entre 51 y 90 años y el resto entre 18 y 50 años (Figura 38). Esto significa que es una población de edad avanzada. La SAGARPA y la FAO (2014) reportan que los responsables de las unidades económicas rurales (UER) en México tienen en promedio 54.6 años de los cuales un poco menos del 60% tienen más de 50 años. Respecto al género, todos los entrevistados son del género masculino.

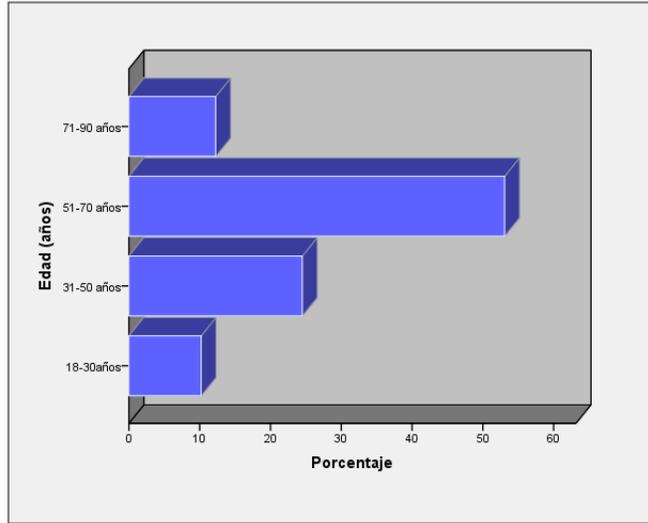


Figura 38. Edad de los productores

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

**Nivel de escolaridad:** Casi la mitad (49.0%) tienen un nivel educativo básico, concluyeron los estudios del nivel primaria y secundaria, y 8.1% terminaron preparatoria u otro nivel equivalente. Sin embargo, casi una tercera parte (28.6%) no terminó la primaria (Cuadro 18). El análisis del nivel de escolaridad de los productores es relevante, ya que presenta dos características: edad avanzada y escolaridad baja. La SAGARPA y la FAO (2014) reportan que en el sector rural mexicano el 21.1% de los responsables de las Unidades Económicas Rurales (UER) carecen de escolaridad y el 56.6% cuentan con algún tipo de instrucción básica características similares a las de los productores de este estudio, al igual a los reportados por Santacruz (2010) en un estudio realizado en la Huasteca Potosina sobre percepción de problemática ambiental, así como a lo reportado por Bustamante *et al.* (2016) de los productores cercanos al Río Tlapaneco en la población ribereña del estado de Guerrero, México.

Cuadro 18. Nivel de escolaridad de los productores usuarios del agua de Santa Ana Coatepec, Huaquechula, Puebla

NIVEL EDUCATIVO	FRECUENCIA	%
Primaria incompleta	14	28.6
Primaria terminada	20	40.9
Secundaria incompleta	1	2.0
Secundaria completa	4	8.2
Preparatoria o equivalente terminado	3	6.1
Otro	1	2.0
Ninguno	6	12.2
Total	49	100.0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

### 5.3.2 Régimen, distribución y uso de la tierra

El régimen predominante es la pequeña propiedad (44.9%) y en segundo lugar el ejido (36.7%); solo el 2.0% tiene terrenos comunales y 16.4% tiene dos tipos de régimen (Figura 39).

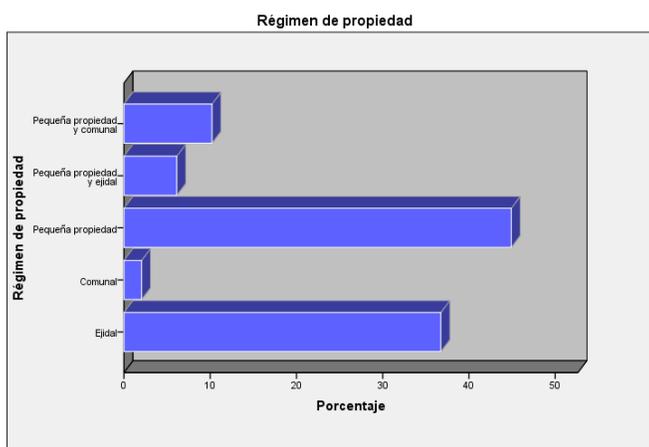


Figura 39. Régimen de propiedad

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

La superficie promedio es de 1.0 ha, con una mínima de 0.25 y una máxima de 5 ha. La mayoría (73.5%) posee entre 0.25 y 1.0 ha, el resto (26.5%) entre 1.25 y 5 ha,

con una mediana de 0.75 (Figura 40). La superficie se distribuye entre uno y cuatro predios.

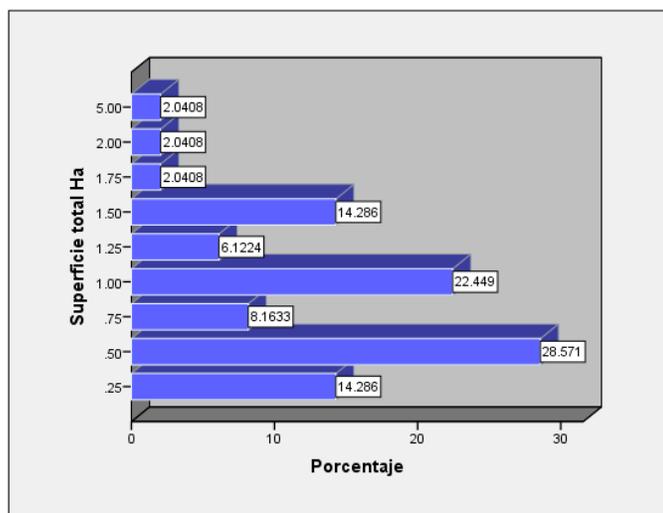


Figura 40. Superficie que poseen los productores

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

El 100% de la superficie (120 ha) es de uso agrícola, 98.1% es de riego y 1.9% se practica agricultura de temporal y se complementa con riego de auxilio.

### 5.3.3 Origen, distribución y manejo del agua

El agua que se emplea en el riego de los cultivos proviene casi en su totalidad del canal principal, que es alimentado con aguas del Río Cantarranas<sup>8</sup>, y aguas tratadas en la planta de tratamiento. Algunos productores además hacen uso del agua de pozos profundos que se encuentran en el ejido. 55.10% riega con agua del canal principal (mezcla del agua del Cantarranas y de la PTAR), y 44.9% además de usar agua del canal principal mezclada con agua de la PTAR, emplea agua de pozo profundo.

<sup>8</sup> El Río Cantarranas inicia donde nacen los manantiales de San Baltazar Atlimeyaya, cuyas aguas son conducidas por el canal Catecuxco con un gasto estimado de  $1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (CONAGUA, 2015), este afluente cruza el municipio de Atlixco y en algunos puntos recoge aguas residuales (observación de campo).

La distribución del agua del canal es por tandeo: 85.5% de los productores recibe agua cada dos semanas, 12.5 % cada semana y 2.0% cada mes. La cantidad de agua recibida fluctúa entre 6 y 10 pulgadas. Un 71.4% recibe 8 pulgadas, el 26.5% recibe 6 pulgadas y tan solo el 2.0% recibe 10 pulgadas. El 100% de los productores considera que el agua que recibe le alcanza para regar sus cultivos.

La disponibilidad de agua permite desarrollar un agrosistema diverso. En opinión de los productores se siembran 14 cultivos entre básicos, hortalizas, flores, forrajes y aromáticos. La mayoría de los productores siembran maíz (79.6%), calabacita (42.9%) y huauzontle y en menor proporción el resto de cultivos (Cuadro 19).

**Cuadro 19. Cultivos irrigados con agua del canal principal Compuerta “El Potrero”**

<b>Básicos</b>	<b>%</b>	<b>Hortalizas</b>	<b>%</b>	<b>Flores</b>	<b>%</b>	<b>Forrajes</b>	<b>%</b>	<b>Aromáticos</b>	<b>%</b>
Maíz	79.6	Calabacita	42.9	Terciopelo	24.4	Alfalfa	32.6	Te limón	32.7
Frijol	20.4	Huauzontle	40.8	Cempasúchil	20.4	Maíz forrajero	24.4		
Sorgo	6.1	Quelite	24.4						
		Tomate verde	14.2						
		Ejote	6.1						
		Jícama	4.0						

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

### **5.3.4 Conocimiento sobre el origen y la calidad del agua del canal**

El 69.4% conoce la procedencia del agua que ingresa a la PTAR y 87.2% considera que está contaminada por los desechos de los drenajes de la ciudad de Atlixco, con basura, aceites y bacterias (Figura 41), los productores perciben que el agua está contaminada, situación observada por Santacruz con productores de la Huasteca Potosina (2010).

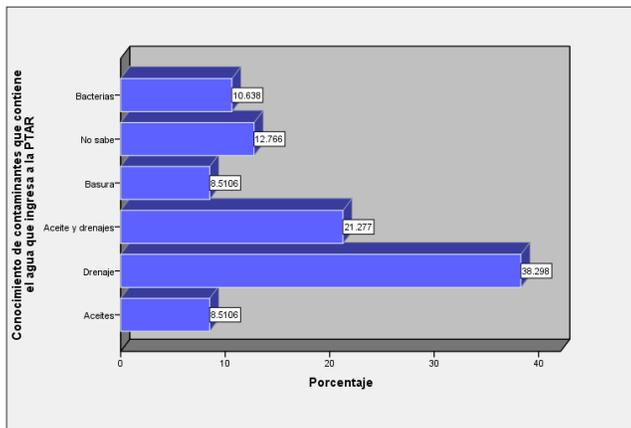


Figura 41. Percepción de los productores sobre el agua que ingresa a la PTAR

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

El 97.9 % de los productores, sabe que el agua tratada por la PTAR se conduce al canal y se junta con las aguas del Río Cantarranas. 73.5% consideran que el agua está sucia, 10.2% señala que lleva basura y 6.1% dijo que tiene mal olor. Sólo 10.2% considera que está limpia (Figura 42).

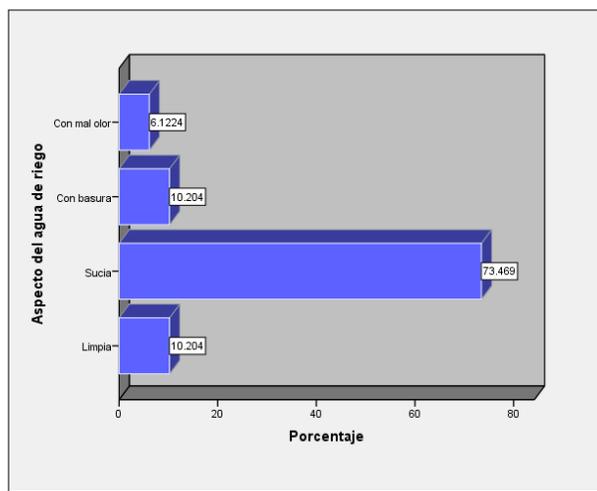


Figura 42. Percepción de los productores sobre el agua del canal

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

De acuerdo al aspecto que observan los productores otorgaran la siguiente calificación: el 51.0% la califica ligeramente sucia, 32.7% sucia y el 16.3% limpia (Cuadro 20).

Cuadro 20. Calidad del agua del canal en percepción de los productores

CALIFICACIÓN	FRECUENCIA	PORCENTAJE
Limpia	8	16.3
Ligeramente sucia	25	51.0
Sucia	16	32.7
Total	49	100.0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

### 5.3.5 Percepción de los productores sobre los efectos del agua tratada

Poco más de la mitad (55.1%) de los productores argumentaron no haber observado cambios en sus cultivos por regar con las aguas tratadas provenientes de la PTAR, mientras 44.9% afirmaron haber observado cambios en el follaje de maíz, es más abundante, de coloración verde intenso y mayor altura de la planta.

En relación a los efectos en suelo agrícola, 77.5% no lo han percibido, sin embargo, 22.4% afirmaron haber observado cambios. De estos, 72.7% consideraron que el suelo está mejor fertilizado al observar plantas de mayor tamaño y con hojas más verdes, no obstante 27.3% han observado que sus cultivos son más susceptibles a plagas.

Respecto a la salud en las personas por el manejo del agua antes que fueran tratadas, 6.1% señaló haber presentado problemas en la piel y la mayor parte (93.9%) reportó que no presentó ningún tipo de malestar. En percepción de los productores 46.9% afirmaron que el problema en piel aumentó al manejar las aguas recibidas de la PTAR; sin embargo, 53.1% no presentaron ningún tipo de malestar, problemas similares fueron observados en productores de Namdinh, provincia de Vietnam (Trang *et al.*, 2006), así como productores de los municipios de Progreso de Obregón y Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo (Ledezma *et al.*, 2016).

### 5.3.6 Percepción de los productores sobre la participación de la PTAR

Desde que los productores comenzaron a recibir las aguas tratadas, las percepciones se han dividido: 50% consideran que la cantidad de agua que reciben aumentó; 32.4% consideran que es la misma cantidad y 17.6% han notado que el servicio no es continuo (Figura 43).

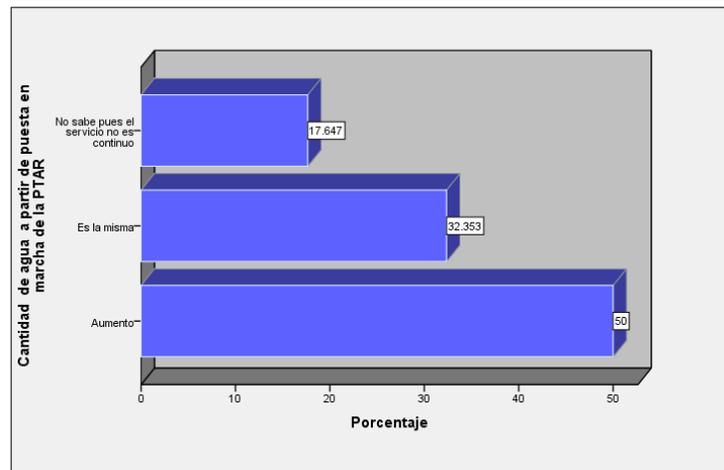


Figura 43. Percepción de los productores sobre la recepción de agua de la PTAR

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

De igual forma existen diferente percepción con relación a la importancia de la cantidad y calidad del agua: 38.8% consideran que es más importante la cantidad ya que pueden regar mayor superficie; un porcentaje semejante (36.7%) argumentan que es más importante la calidad y 24.5% consideran que ambas son importantes, ya que los cultivos irrigados son de mejor calidad, se realiza un mejor riego y no se afecta al suelo a (Figura 44).

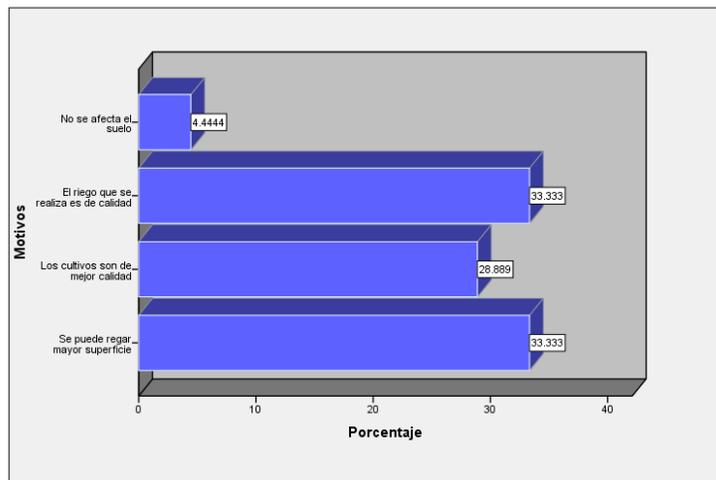


Figura 44. Percepción de los productores sobre la cantidad y calidad del agua

Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

El 100% de los productores están de acuerdo en utilizar el agua de la PTAR, por dos razones: disponen de mayor cantidad de agua y es de gran apoyo en el periodo de escasez; sin embargo, también consideran que no tienen opción y deben aceptarla por imposición de las autoridades.

La mayor parte (73.5%) considera que es benéfico tratar las aguas residuales, 2.0% argumenta lo contrario, el resto no sabe o no contesta; estos resultados son similares a los reportados por Mizyed (2013) con productores en Cisjordania (Cuadro 21).

Cuadro 21. Percepción de los productores referente al beneficio de tratar las aguas residuales

	Frecuencia	Porcentaje
Es benéfico tratar las aguas residuales	36	73.5
No es benéfico tratar las aguas residuales	1	2.0
No sabe	10	20.4
No contesta	2	4.1
Total	49	100.0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

Para el caso en estudio, los productores opinaron que tratar las aguas residuales es benéfico para tener agua más limpia (56.1%), y entre más limpia el agua los cultivos son de calidad (14.6%), estas opiniones son similares a la de productores de península de Placencia, Belice (Wells *et al.*, 2016) (Figura 45).

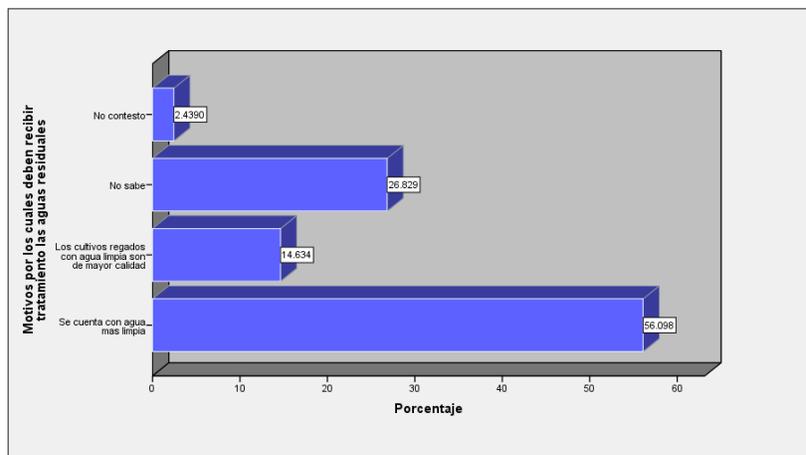


Figura 45. Opinión de los productores por lo que se deben tratar las aguas residuales

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

La mayoría (77.6%) de los productores desconoce que el proceso de tratamiento de aguas residuales de la PTAR también genera lodos; 22.4% que los conoce, así como sus beneficios, opinó que sí los emplearía en sus parcelas porque aportan nutrientes al suelo.

Todos los productores coinciden que el agua para el riego de sus cultivos debe ser de calidad. Sin embargo, 36.7% no tiene una propuesta al respecto, 22.4% opinaron que deben organizarse mejor dentro del ejido para hacer propuestas, 14.3% comentaron que el ejido debe apoyar al tratamiento de aguas residuales y el resto consideraron importante participar en la limpieza del canal, cuidar el agua y pagar cuotas (Cuadro 22).

Cuadro 22. Propuestas de participación para mejorar la calidad del agua

	Frecuencia	Porcentaje
Pagando cuotas	1	2.0
Cuidando el agua	3	6.1
Apoyando al tratamiento de las aguas residuales	7	14.3
Participando en la limpieza del canal	7	14.3
Mejorando la organización	11	22.4
No sabe	18	36.7
No contesto	2	4.1
Total	49	100.0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

### 5.3.7 Prueba de hipótesis

La hipótesis específica 4 señala: **“En percepción de los productores, el uso de aguas tratadas beneficia al suelo y a los cultivos y no les ocasiona problemas en su salud”**. El análisis realizado muestra que los productores de la comunidad de Santa Ana Coatepec, sólo una quinta parte (22.4%) han observado cambios en suelo, señalando que están más fertilizados y sobre el efecto en los cultivos la opinión es dividida. Perciben beneficios en la cantidad de agua que reciben, ya que se ha incrementado principalmente en época de estiaje. Con relación a la salud han observados cambios a partir del uso de agua tratada, sobre todo mayor irritación en la piel.

Para conocer la relación de las variables de percepción con algún factor, se realizó un análisis de frecuencias y porcentajes de las variables de percepción (contaminación del agua, mejoramiento de los cultivos, cambios en suelo y presencia de malestares) en relación a la edad, la escolaridad y la superficie que poseen los productores, como se observa en el Cuadro 23.

Cuadro 23. Contraste de variables de percepción

		Percepciones															
		Contaminación del agua				Mejoramiento de los cultivo				Cambios en suelo				Presencia de malestares			
		Si		No		Si		No		Si		No		Si		No	
Edad (años)	Total de productores	F*	%	F	%	F	%	F	%	F	%	F	%	F	%	F	%
18-30	5	5	100.0	0	0.0	4	80.0	1	20.0	0	0.0	5	100.0	1	20.0	4	80.0
31-50	12	10	83.3	2	16.7	2	16.7	10	83.3	1	8.3	11	91.7	6	50.0	6	50.0
51-70	26	23	88.5	3	11.5	13	50.0	13	50.0	9	34.6	17	65.4	14	53.8	12	46.2
71-90	6	3	50.0	3	50.0	3	50.0	13	216.7	1	16.7	5	83.3	2	33.3	4	66.7
<b>Escolaridad</b>																	
Ninguno	6	3	50.0	3	50.0	1	16.7	5	83.3	1	16.7	5	83.3	2	33.3	4	66.7
Algún grado de primaria	34	29	85.3	5	14.7	16	47.1	18	52.9	9	26.5	25	73.5	20	58.8	14	41.2
Algún grado de secundaria	5	5	100.0	0	0.0	1	20.0	4	80.0	1	20.0	4	80.0	1	20.0	4	80.0
Preparatoria u otro	4	4	100.0	0	0.0	4	100.0	0	0.0	0	0.0	4	100.0	0	0.0	4	100.0
<b>Superficie total en ha</b>																	
<0.5	21	18	85.7	3	14.3	9	42.9	12	57.1	2	9.5	19	90.5	11	52.4	10	47.6
0.51-1.0	15	11	73.3	4	26.7	6	40.0	9	60.0	6	40.0	9	60.0	6	40.0	9	60.0
1.1-1.5	10	9	90.0	1	10.0	2	20.0	8	80.0	2	20.0	8	80.0	6	60.0	4	40.0
>1.5	3	3	100.0	0	0.0	2	66.7	1	33.3	1	33.3	2	66.7	0	0.0	3	100.0

\*Frecuencia

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

Para evaluar la asociación de estas variables se realizó una prueba de Chi cuadrada, partiendo de las siguientes hipótesis estadísticas:

Hipótesis 1.

**Ho.** No existe relación entre las variables de percepción y la edad de los productores.

**Ha.** Existe relación entre las variables de percepción y la edad de los productores.

Hipótesis 2.

**Ho.** No existe relación entre las variables de percepción y la escolaridad de los productores.

**Ha.** Existe relación entre las variables de percepción y la escolaridad de los productores.

Hipótesis 3.

**Ho.** No existe relación entre las variables de percepción y la superficie total que poseen los productores.

**Ha.** Existe relación entre las variables de percepción y la superficie total que poseen los productores.

Los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 24.

Cuadro 24. Prueba de Chi cuadrada

Variables	Edad		Escolaridad		Superficie	
	Chi cuadrada	Sig. asintótica (bilateral)	Chi cuadrada	Sig. asintótica (bilateral)	Chi cuadrada	Sig. asintótica (bilateral)
Contaminación del agua	6.393	0.094	6.802	0.078	2.116	0.549
Favorecimiento en cultivos	5.147	0.161	8.159	0.043	0.861	0.835
Cambios en suelo	6.693	0.082	1.606	0.658	4.908	0.179
Presencia de malestares	2.446	0.48	7.369	0.061	3.878	0.275

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo 2015. n=49

La prueba de Chi-cuadrada de Pearson indicó una relación significativa ( $p_{0.05}=0.043$ ) entre la percepción de los que terminaron o no la primaria y los efectos en el mejoramiento del cultivo, y datos cercanos aunque no significativos en la contaminación del agua ( $p_{0.05}=0.078$ ) y molestias en piel ( $p_{0.05}=0.061$ ). No se presentó relación con la edad y la superficie de riego disponible (Cuadro 3), por lo que se rechazan las tres hipótesis estadísticas, y se acepta la hipótesis alternativa de la hipótesis 2.

En general se acepta parcialmente la hipótesis específica 4, debido a que si perciben beneficios en el suelo y cultivos y si ocasiona problemas en la salud de los productores.

#### 5.4 Análisis integral del estudio

A nivel mundial, el uso de agua de riego de baja calidad es una práctica cada vez más frecuente, ya que es una fuente barata para zonas con régimen pluvial errático y por la escasez creciente de agua para riego (Winpenny *et al.*, 2013).

Sin embargo, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura, como son salinización de los suelos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, fijación y migración de contaminantes en suelos y plantas, y su eventual impacto por el consumo de alimentos por parte del ser humano (Guadarrama & Galván, 2015), como se muestra en las Figuras 46 y 47.

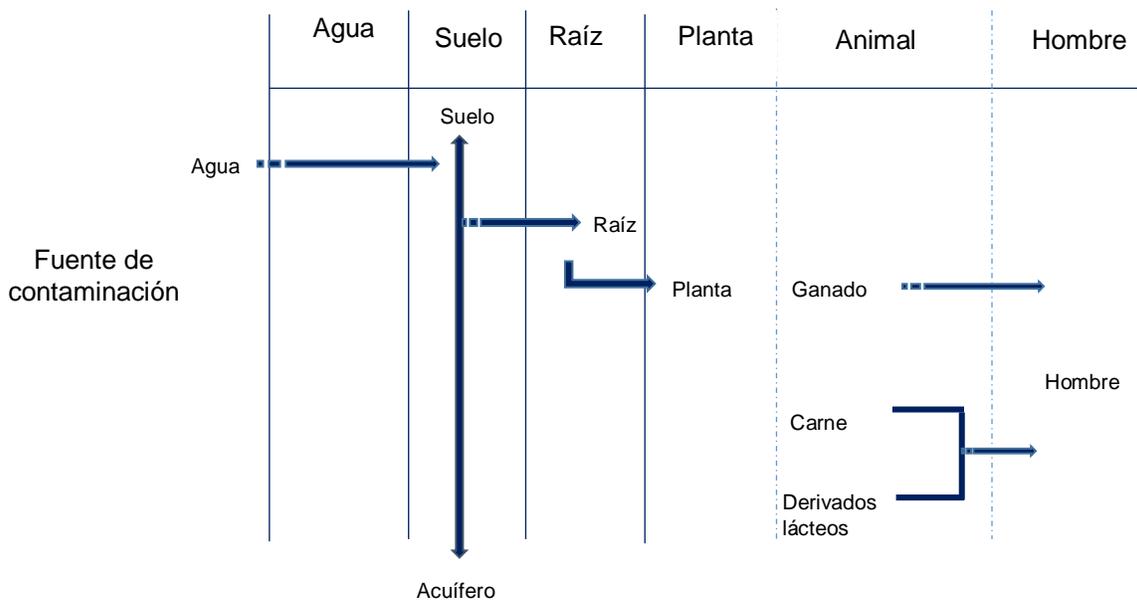


Figura 46. Ruta de migración de contaminantes

Fuente: Guadarrama & Galván, 2015

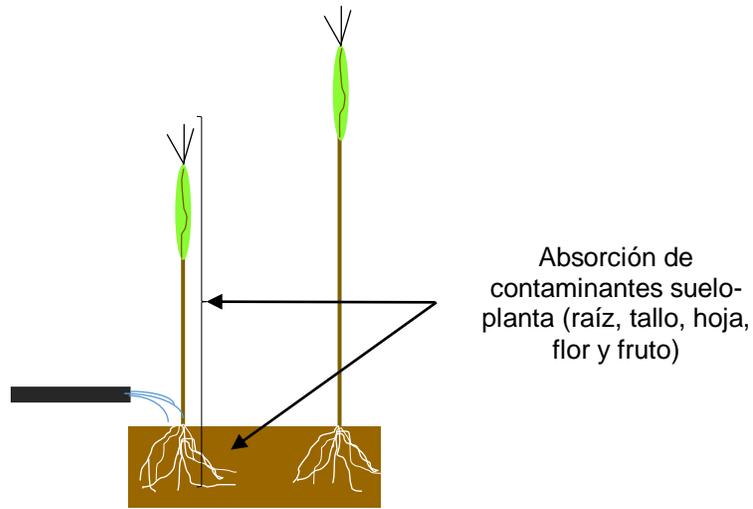


Figura 47. Sistema agua-suelo-planta

Fuente: Guadarrama & Galván, 2015

En el estudio en cuestión se observa este proceso en la calidad de los recursos hídricos, el suelo y la absorción por las plantas, evidenciando que el agua presenta problemas de salinidad, los cuales se ven reflejados en la calidad del suelo.

En el caso de metales pesados, en la figura 48 se observan las concentraciones de Pb en todos los puntos de muestreo (agua-suelo-planta), las concentraciones más altas se localizan en planta, es específico en la raíz. Núñez (citado en Padilla *et al.*, 2015) observó que la concentración de un metal en diferentes órganos de unas 75 plantas tiende a ser mayor en la raíz, seguido de las hojas, los tallos, las inflorescencias y las semillas. Tal orden varía según la especie. En algunas plantas el Pb es capaz de acumularse principalmente en las raíces, siendo mínima su presencia en otras partes u órganos de los cultivos (Kabata-Pendias, 2011).

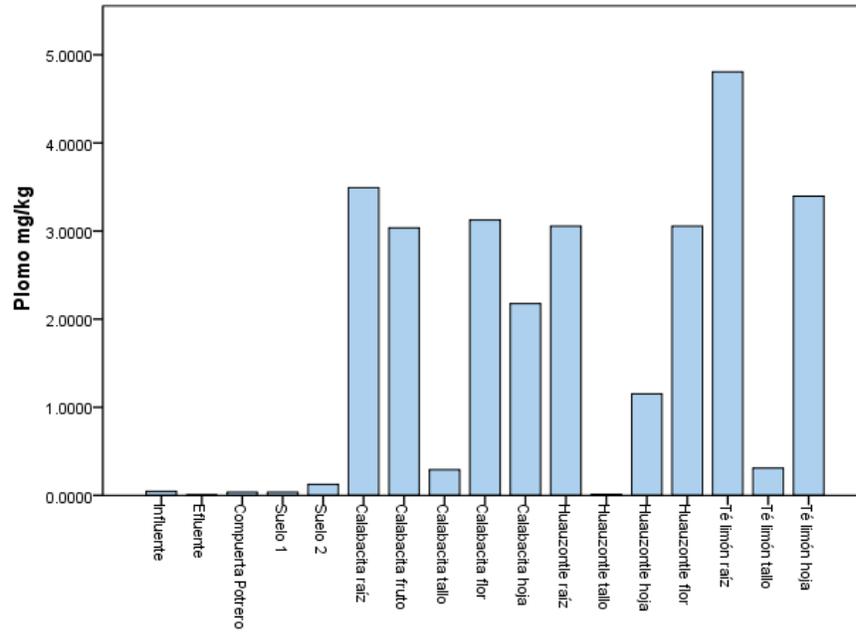


Figura 48. Concentración de plomo en agua, suelo y planta

El Cadmio solo se presentó en suelo en concentraciones mínimas (Figura 49).

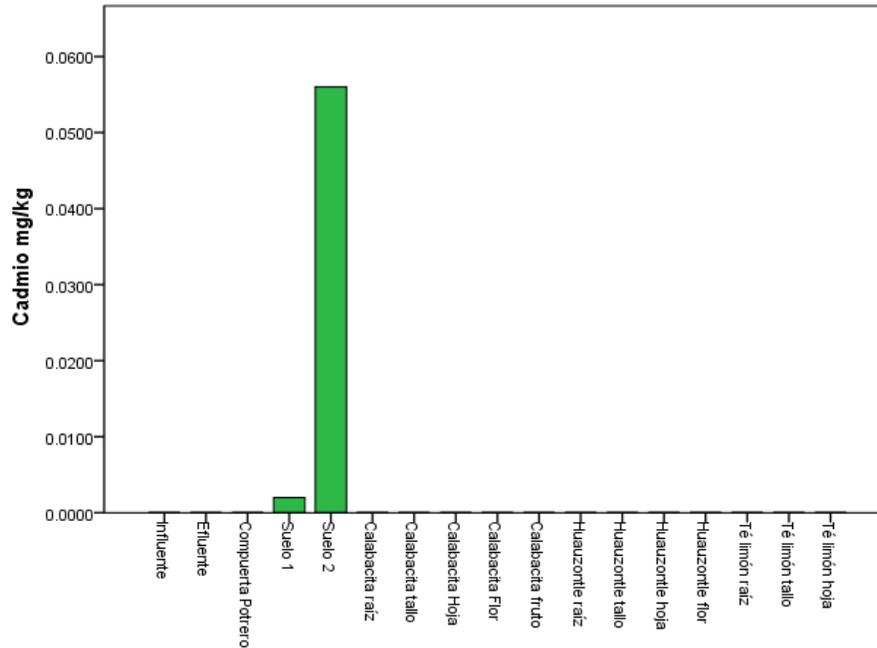


Figura 49. Concentración de cadmio en agua, suelo y planta

En níquel las concentraciones más elevadas se observan en planta (Figura 50) esto obedece a que puede llegar a ser menos adsorbido en suelos, puede ser fácilmente adsorbido por las plantas y ser ligeramente tóxico para las mismas, siendo un elemento móvil en los tejidos de las plantas, se acumulan preferiblemente en las hojas y en las semillas (Corinne *et al.*, 2006; Kabata-Pendias & Mukherjee, 2007), es a partir de la acumulación excesiva de este metal en plantas, que surge el término de “hiperacumuladoras”, que son las plantas capaces de absorber cantidades excesivas de metales pesados (Brooks *et al.*, 1977).

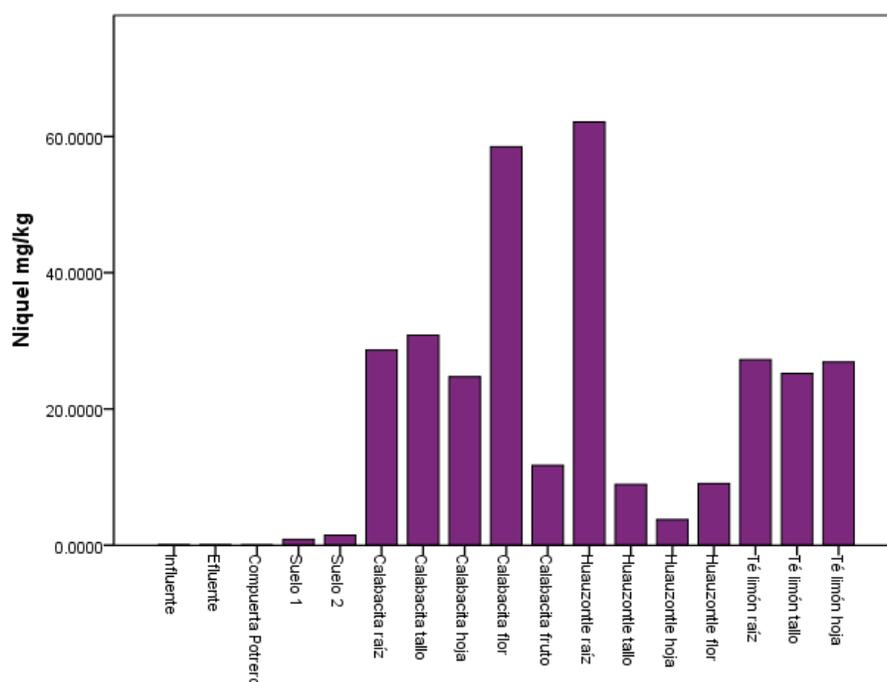


Figura 50. Concentración de níquel en agua, suelo y planta

Las concentraciones elevadas de Pb y Ni en planta pudiera suponerse proceden de una fuente diferente al agua y suelo, ya que pueden ser afectadas por otros factores como puede ser la aplicación de fertilizantes (Devkota & Schmidt, 2000; Frost & Ketchum, 2000), para determinar con exactitud el origen de estos, se sugiere realizar un estudio más profundo.

Respecto a la percepción de los productores existen opiniones diferentes; para algunos el agua residual tratada beneficia al suelo, a las plantas y no afecta su salud, sin embargo, para otros, no han percibido cambios y si afecta su salud.

La hipótesis general planteada es: **“La calidad del agua residual tratada cumple con la normativa oficial mexicana e internacional para su uso agrícola, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de suelo sin afectar los cultivos, y en percepción de los productores los efectos son positivos”**. Al contrastar las cuatro hipótesis específicas se concluye que la hipótesis se acepta parcialmente, ya que cumple con la normatividad oficial mexicana e internacional, sin embargo, se encontraron parámetros que ponen en riesgo los recursos naturales y la salud humana.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este apartado, se presentan las conclusiones y recomendaciones a partir de los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

### Conclusiones

Con base en el problema de investigación, los objetivos e hipótesis planteados, orientado a conocer el efecto generado por la implementación de una alternativa al saneamiento de agua residual, empleada en la actividad agrícola, y con la finalidad de generar alternativas para un uso adecuado, se concluye lo siguiente:

#### Calidad del agua

- El agua residual tratada (efluente) cumple con la normatividad nacional e internacional en los parámetros analizados en este estudio.
- La calidad agronómica muestra que para el caso del influente (agua residual cruda), existen riesgos de salinidad en suelos, su uso se clasifica como restringido, el efluente, al igual que el punto de riego, presenta baja sodicidad, pero riesgo de salinización.

#### Calidad del suelo

- El suelo presenta salinidad, debido a su baja cantidad de materia orgánica.
- Los metales pesados cuantificados (Pb, Cd, Ni), presentan concentraciones mínimas y se encuentra dentro de los límites permisibles.

## Calidad de los cultivos

- Los cultivos analizados (calabacita, huauzontle y té limón) con relación a la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Ni) muestran presencia de trazas Pb y Ni, pero no de Cadmio.
- El plomo se encuentra en límites permisibles, presentando concentraciones elevadas en las partes comestibles (flor y fruto de calabacita, flor de huauzontle y hoja de té limón) comparado con el resto de la planta.
- El níquel se encuentra en límites tóxicos en los cultivos de calabacita y té limón en toda la estructura de la planta (lo que incluye las partes comestibles).

## Percepción de los productores usuarios del agua residual tratada

- Los productores conocen la procedencia del agua que ingresa a la PTAR, son sabedores que el agua tratada es vertida al Río Cantarranas que alimenta al canal principal, fuente primaria de recurso hídrico que emplean en la irrigación de cultivos.
- El agua que reciben se incrementó a partir de la puesta en marcha de la PTAR.
- Han observado cambios positivos y negativos en el suelo y en los cultivos.
- Para los productores es más importante la cantidad que la calidad de agua que reciben
- Los problemas de salud son básicamente de la piel (dermatitis), se han observado antes e incrementando a partir del uso de agua tratada.

- Los productores consideran benéfico tratar las aguas residuales.

Con base en lo anterior se concluye que a 4 años de la puesta en marcha de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales:

- i) La PTAR ha cumplido su objetivo, al mejorar la calidad de las aguas residuales provenientes de la ciudad de Atlixco.
- ii) Los productores usuarios del agua se han visto beneficiados en la cantidad de agua recibida, pero no existe convencimiento sobre beneficios respecto a su calidad.
- iii) La baja calidad del agua que llega a los campos de cultivo se debe a que el agua tratada por la PTAR tiene como cuerpo receptor o de reúso al Río Cantarranas que conduce aguas residuales. Esto pone en cuestionamiento el proceso de gestión del agua para uso agrícola.

### **Recomendaciones**

La gestión de los recursos hídricos con base al modelo PER, considera que el Estado debe ejecutar acciones cuando las actividades humanas ejercen de una manera directa e indirecta presiones sobre el ambiente, afectando la calidad y cantidad de recursos naturales.

De acuerdo a los resultados encontrados en la presente investigación se plantean las siguientes recomendaciones:

#### **Para la PTAR Atlixco**

- El proceso de saneamiento cumple con la normatividad establecida, pero la calidad para ser empleada en riego agrícola presenta restricciones por lo cual se recomienda que si el destino final del agua es el riego se realice un proceso de depuración complementario para garantizar la calidad; entre los procesos alternativos se encuentran los humedales artificiales, que son

medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una abundante vegetación, reuniendo ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un potencial autodepurador elevado.

- Aprovechar la capacidad de la planta para tratar un mayor volumen de agua. Actualmente se encuentra operando en un 50% de su capacidad.
- Implementar procesos de comunicación con los usuarios de agua. Los usuarios de agua tratada deben estar informados de la labor que conlleva el saneamiento de agua residual, así como los beneficios obtenidos. Entre los procesos que se recomiendan: pláticas informativas, talleres participativos y visitas guiadas a la PTAR.
- Considerando que los lodos son parte del proceso de saneamiento de agua residual (no analizados en este estudio), es importante que se consideren en una propuesta para su aprovechamiento, puesto que son de gran importancia por ser una fuente potencial de la materia orgánica y pueden ser utilizados en:
  - i) Agricultura (como abono).
  - ii) Recuperación de terrenos agotados.
  - iii) Compostaje.

**Para las instituciones:**

**Comisión Nacional del Agua, Ayuntamiento y SOAPAMA**

- Monitoreo o evaluación permanente de los efectos de este tipo de acciones enfocadas al buen uso y conservación de los recursos hídricos (PTAR´S), mediante un plan de vigilancia.
- Construir infraestructura de conducción para separar las aguas tratadas de las aguas residuales.

- Establecer un plan de capacitación a todos los actores del proceso de saneamiento y uso del agua, con un enfoque de sostenibilidad y nueva cultura del agua.

### **Para las instituciones de investigación y de educación**

- Considerar en sus planes de estudios este tipo de problemas ambientales, con el objetivo de formar profesionales capacitados que puedan hacer frente a estos desafíos en materia de buen uso y conservación de los recursos naturales.
- Realizar investigaciones con diferentes enfoques teórico – metodológicos que explique este tipo de problemáticas y propongan soluciones.

### **Para los productores usuarios del agua residual tratada**

- Participar en los programas y acciones que las instituciones implementen respecto al mejoramiento y uso del agua que utilizan en el riego de sus cultivos.
- Solicitar estudios sobre la calidad del agua, suelo y plantas en toda la zona de riego e implementar acciones para su conservación.
- Separar el agua de riego proveniente del canal principal y el agua de pozo profundo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. 2002. "Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles". *Environmental Pollution*, 119(2), 177-193.
- Achkar, M. 2002. "Hacia la Gestión Sustentable del Agua". Programa Uruguay Sustentable. Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio. Informe Técnico.
- Aguiló A. M., Aramburu M. M. P., Blanco A. A., Calatayud P. L. T., Carrasco G. R. M., Castilla C. G., & Diaz S. M. 1998. "Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología". Ministerio de Medio Ambiente, Madrid (España). Secretaría General Técnica..
- Alexandratos, N. 1995. "Agricultura mundial hacia el año 2010": estudio de la FAO. Food & Agriculture Org.
- Angelova, V., Ivanova, R., Delibaltova, V., & Ivanov, K. 2004. "Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp)". *Industrial crops and products*, 19(3), 197-205.
- Anton, D. y Díaz, D. C. 2000. "Sequía en un mundo de agua. Costa Rica". Piriguazú Ediciones. p.p. 411.
- Alcántar, G. G., Etchevers, B. J. D. & Aguilar, S. A. 1992. "Los análisis físicos y químicos. Su aplicación en agronomía". Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, México.

Alcántar, G. G. & Sandoval, V. M. 1999. "Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal". Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.

AQUASTAT, FAO. 2015. Disponible en:  
[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/MEX/Tables.htm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/MEX/Tables.htm)

Argentel, L., González, L.M., Plana, R. 2006. "Efecto de altas concentraciones salinas sobre la germinación y el crecimiento del trigo (*Triticum aestivum*) variedad cuba-c 204". *Cultivos tropicales*, 27: 45-48.

Asch, S. E. 1968. "Wolfgang Köhler: 1887-1967". *The American journal of psychology*, 110-119.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. 1976. "Water quality for agricultura". FAO. Irrigation and Drainage. Paper No. 29. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Rome, Italy.

Barrow, C. J. 1998. "River basin planning and management. A critical review". *World Development* [en internet]. Vol. 26. No.1 pág.171-186. University of Wales: Pergamon. Disponible en:  
[http://redac.eng.usm.my/EAD/EAD514/Barrow\\_RBP.pdf](http://redac.eng.usm.my/EAD/EAD514/Barrow_RBP.pdf).

Benez, M. C., Kauffer M., E. F., & Álvarez Gordillo, G. D. C. 2010. "Percepciones ambientales de la calidad del agua superficial en la microcuenca del Río Fogótico, Chiapas". *Frontera Norte*, 22(43), 129-158.

Bernier, R. 2011. "Curso de Capacitación para operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados INDAP, Décima Región". Centro Regional de Investigación Remehue, Instituto de Investigaciones

<http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR25010.pdf>

Blazquez, P & Montero M. C. 2010. "Reutilización de aguas en Bahía Blanca Plata 3ra Cuenca". Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional (edUTecNe) [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua\\_reutilizacion.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua_reutilizacion.pdf).

Brooks, R. R., Lee, J., Reeves, R. D. & Jaffré, T. 1977. "Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants". *Journal of Geochemical Exploration*, 7, 49-57.

Brown, P. H., Welch, R. M., & Cary, E. E. 1987. "Nickel: A micronutrient essential for higher plants". *Plant Physiology*, 85(3), 801-803.

Bustamante, G. A., Galindo, de J. G., Jaramillo, V. J. L. & Vargas, L. S. 2016. "Percepción de la contaminación del Río Tlapaneco por la población ribereña". *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 13(1), 47-62.

Calder, I.R. 1999. "The blue revolution: land use and integrated water resources management". Earthscan, London.

Can, C. A., Ramírez G. L. G., Ortega E. H. M., Cruz C. E., Flores R. D., Sánchez B. E. I. & Madueño M. A. 2014. "Germinación y crecimiento de plántulas de *Phaseolus vulgaris* L. en condiciones de salinidad". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5: 753-763.

Castañeda, M. B. 2010. "Procesamiento de datos y análisis estadísticos utilizando SPSS: Un libro práctico para investigadores y administradores educativos". EDIPUCRS.

- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X. & Aguilar-Santelises, A. 2000. "Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas". Segunda edición. Instituto Nacional de Capacitación (INCAPA). Guanajuato, México.
- CCME (Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente), 2014. "Guías sobre calidad del agua". Disponible en: <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/en/index.html#void>.
- CE (Comisión Europea), 1998. "Hacia la gestión sostenible de los recursos hídricos". Comisión Europea, Bruselas.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 1995. "Mercados de derecho de agua: entorno legal", LC/R, Santiago de Chile.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 1998. "Recomendaciones de las reuniones internacionales sobre el agua: de Mar de Plata a París LC/R", Santiago de Chile.
- Chan, D. Y., & Hale, B. A. 2004. "Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation". *Journal of Experimental Botany*, 55(408), 2571-2579.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2012. "Portal de Geoinformación". Sistema Nacional de Información Sobre Diversidad. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. "Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación". p.p. 401.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012a. "Agua en el mundo". Disponible: URL (<http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=87&n4=37>)

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2012b. "Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco". Memoria documental. Disponible: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/MEMORIAS%20DOCUMENTALES/Memoria%20Documental%20Planta%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20de%20Atotonilco.pdf>

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2013a. "Indicadores de calidad del agua". Consultado el 01/10/2014. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=63&n3=98&n4=444>.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2013b. "Inventario Nacional de Plantas Municipales de Operación, Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación". Diciembre 2013. Consultado el 01/01/2015. Disponible en: [http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/Estadisticas\\_20142018/Publicaciones2014/Inventario%20Nacional%20de%20Planta%20Municipales%20De%20Potabilizaci%C3%B3n\\_SGAPDS-5-14.pdf](http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/Estadisticas_20142018/Publicaciones2014/Inventario%20Nacional%20de%20Planta%20Municipales%20De%20Potabilizaci%C3%B3n_SGAPDS-5-14.pdf).

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. "Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento". Consultado el 01/01/2015. Disponible en: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105137/Ley\\_Aguas\\_Nacionales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105137/Ley_Aguas_Nacionales.pdf)

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. "Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año Agrícola 2013-2014". Consultado el 09/10/2016. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGIH-6-15.pdf>

- Corinne, P. R., Fang J. Z. & Steve, P. M. 2006. "Phytotoxicity of nickel in a range of European soils: Influence of soil properties, Ni solubility and speciation", *Environmental Pollution* 145: 596-605
- Dinar, A., Rosengrant, M. W. & Meinzen-Dick, R. 1997. "Water Allocation Mechanisms. Principles and Examples". The World Bank e International Food Policy Research Institute.
- DOF (*Diario Oficial de la Federación*). 2006. "LEY General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)".
- EFSA (European Food Safety Authority Scientific). 2010. "Opinion on Lead in Food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM)". *The EFSA Journal*, 8 (4), pp: 1.570. revista del comité científico nº 16 20
- EFSA (European Food Safety Authority). 2011. "Statement on tolerable weekly intake for cadmium. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM)". *The EFSA Journal*, 9 (2), pp: 1.975.
- EFSA (European Food Safety Authority). 2012. "Cadmium dietary exposure in the European population". *The EFSA Journal*, 10 (1), pp: 2.5
- Enkerlin, C. E., Cano G., Garza R. & Vogai E. A. 1997. "Ciencia ambiental y desarrollo sostenible". México. Internacional Thomson Editores. Pág. 690.
- EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). 2016. "Introducción a la Ley de Agua Limpia". Disponible en: [https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion\\_a\\_la\\_Ley\\_de\\_Agua\\_Limpia.pdf](https://cfpub.epa.gov/watertrain/pdf/modules/Introduccion_a_la_Ley_de_Agua_Limpia.pdf).

- Escalante, V., Cardoso, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., & Villavicencio, F. 2003. "El reúso del agua residual tratada en México". In *Memorias del evento: Agua 2003* (p. p. 1-7). IWA.
- Escalas, A. 2006. "Tecnologías y usos de las aguas residuales" en México. Universidad de Concepción Chile, 1-15.
- Esteller, M. V. 2002. "Vulnerabilidad de acuíferos frente al uso de aguas residuales y lodos en agricultura". *Hidrogeología* 2, p.p. 103-113.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2013a. "Decenio internacional para la acción del Agua fuente de vida 2005 – 2015". Disponible: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/background.shtml>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2013b. "Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria". Disponible: <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Fernández, I., Vilas, A., & Para, M. 2007. "Ingesta diaria de níquel entre jóvenes españoles". Valoración del riesgo toxicológico. *Rev. Toxicol*, 24, 10-13.
- Flores, R., & Reyes, L. 2010. "Estudio sobre las percepciones y la educación ambiental". *Tiempo de educar*, 11(22), 227-249.
- Frost, H. L., & Ketchum, L. H. 2000. "Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer". *Advances in Environmental Research*, 4(4), 347-355.
- García, A. 2012. "Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego". *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 6, 27-36.

- García, E. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. “*Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala, 1(1), 000*”.
- Geissler, G., & Arroyo, M. 2011. “El agua como un recurso natural renovable”. México. Trillas.
- Gibson, J. J. 1978. “The ecological approach to the visual perception of pictures. *Leonardo*”, 11(3), 227-235.
- Gleason E. J. A. 2012. “Hacia una gestión sustentable del agua en la zona metropolitana de Guadalajara”. En: Ochoa G. H. y Joachim B. H. (Coordinadores). *Gobernanza y gestión del agua en el occidente de México: La metrópolis de Guadalajara*. ITESO, México, p.p. 217-243.
- Gleick, P. H. 1998. “The human right to water”. *Water Policy*. No. 1. Pág. 487-503. Disponible en: [http://webworld.unesco.org/water/wwap/pccp/cd/pdf/educational\\_tools/course\\_modules/reference\\_documents/issues/thehumanrighttowater.pdf](http://webworld.unesco.org/water/wwap/pccp/cd/pdf/educational_tools/course_modules/reference_documents/issues/thehumanrighttowater.pdf).
- GOOGLE MAPS. 2014. “Google-INEGI”. Consultado 08/08/2014. Disponible en: <https://www.google.com.mx/maps/place/Atlixco,+PUE/@18.9029768,-98.423099,3883m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x85cfb3eee015f935:0x5c4b12a3f9f700e7>.
- Guadarrama, B. M. E. & Galván, F. A. 2015. “Impacto del uso de agua residual en la agricultura”. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 4(7), 22-44.
- GWP (Asociación Mundial para el Agua). 2012. “Manual para la gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas transfronterizas de ríos, lagos y acuíferos”. Disponible en:

[http://www.rioc.org/IMG/pdf/RIOC\\_GWP\\_Manual\\_para\\_la\\_gestion\\_integrada.pdf](http://www.rioc.org/IMG/pdf/RIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf)

He, Z. L., Yang, X. E., Stoffella, P. J., 2005. "Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment". *J. Trace Elem. Med. Biol.* 19, 125-140.

Hendricks, D. 2010. "Fundamentals of water treatment unit processes: physical, chemical, and biological". CRC Press. New York. p. p 927.

Hofwegen, Van, P. J. & Jaspers, F. G. 2000. "Marco analítico para el manejo integrado de recursos hídricos: lineamientos para la evaluación de marcos institucionales". Washington, US. BID.

Hutchinson, GE. 1957. "A treatise on limnology", Vol. 1. Part. I. John Wiley & Sons. New York.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2004. "Guía para la interpretación de cartografía edafología, México". Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EDAFI.pdf>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009a. "Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Atlixco, Puebla". p.p. 9.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009b. "Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Huaquechula, Puebla". p.p. 9.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2011a. "Panorama censal de los organismos operadores de agua en México". Censos económicos 2009. Mexico. p. p. 35

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2011b. "Superficie sembrada total (Hectáreas) Atlixco". Consultado 15/04/2014, Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/Movil/MexicoCifras/mexicoCifras.aspx?em=21019&i=e>.

James, D., and K.L. Wells. 1990. "Soil sample collection and handling: technique based on source and degree of field variability". In: R. L. Westerman (ed), Soil testing and plant analysis. 3rd ed. Soil Sci. Soc. Am., Inc. Madison, WI. p. 25–44.

Jáuregui, J. A., Morales, F. A. B., Castorena, C. Á., Fuentes, H. R., Ortiz, J. C. R., Ramírez, J. G. L., & Montoya, A. H. 2012. "Metales pesados como indicador de impacto de un sistema ecológico fragmentado por usos de suelo, San Luis Potosí, México". *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(2), 15-29.

Jiménez, B. E. 2001. "*La contaminación ambiental en México*". Editorial Limusa.

Jouravlev, A. 2003 "Los Municipios y la gestión de los recursos hídricos". Santiago de Chile: CEPAL-Naciones Unidas, Serie Recursos Naturales e Infraestructura, No. 66.

Julca, O. A. Meneses F. L. Blas S. R. & Bello A. S. 2006. "La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura". *Idesia (Arica)*, 24(1), 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>

Kabata-Pendias, A. 2011. "Trace elements in soils and plants". Fourth edition. Disponible en: [http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace\\_Elements\\_in\\_Soils\\_and\\_Plants](http://www.petronet.ir/documents/10180/2323242/Trace_Elements_in_Soils_and_Plants)

Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. 2007. "*Trace elements from soil to human*". Springer Science & Business Media. Disponible en:

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YQfMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=P1&dq=trace+elements+from+soil+to+human&ots=9IB0bLxz3b&sig=nSCntVArXNEIhXPKjQKoYoY6NDE#v=onepage&q=trace%20elements%20from%20soil%20to%20human&f=false>

- Kosten, S. y E. Guerrero. 2005. "Fundamentos para la Aplicación del *Enfoque Ecosistémico* en el Manejo de Cuencas Hidrográficas y Humedales Fluviales. En: Humedales Fluviales de América del Sur: Hacia un Manejo Sustentable". Ediciones Proteger. Argentina. p. p. 165.
- Lahera, R. V. 2010. "Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales". Universidad Autónoma del Estado de México. *Quivera*, 12(2), 58-69.
- Ledezma, J. C. R., Montiel, R. E., López, M. G. V., García, R. V., & Martínez, D. V. S. 2016. "Conocimiento y percepción respecto al impacto de vivir cerca a canales de aguas residuales". *Journal of Negative and No Positive Results: JONNPR*, (4), 142-148.
- Lein, H. y Tagseth, M. 2009. "Tanzanian water policy reforms, between principles and practical applications". *Water Policy*. Vol. 11, No. 2. Pág. 203-220. Trondheim, Norway.
- Lucho, C. C. A., Álvarez S. M., Beltrán H. R. I., Prieto G. F., & Poggi V. H. M. 2005. "A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater". *Environment International*, 31(3), 313-323.
- Mahler, R. L. 2003. "General overview of nutrition for field and container crops". National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations. Riley, LE, Dumroese RK, Landis, TD Tech. Coords. June, 9-12.

- Mara, D. D., & Cairncross, S. 1989. "Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture". Geneva: World Health Organization.
- Margalef, J. B. 1987. "*Percepción, desarrollo cognitivo y artes visuales (Vol. 5)*". Anthropos Editorial.
- Margalef, R. 1991. "Teoría De Los Sistemas Ecológicos". Ed. Barcanova. Barcelona. 184 pp.
- Marín, A., & Osés, M. 2013. "Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales con el proceso de lodos activados. Tomo I". Manual de procedimientos. *DOP-CEA Jalisco, Gobierno de Jalisco*. p. p 244.
- Marín, G. M. L., Aragón, R. P. & Gómez Benito, C. 2002. "Análisis químico de suelos y agua: manual de laboratorio". Universidad Politécnica de Valencia, Valencia (España).
- Martínez, F. 2002. "*El cuestionario. Un instrumento para la investigación en las ciencias sociales*". Capellades, Barcelona. Colección Psicopedagogía. Ed Laertes. p. p. 111.
- Martínez, G. F. J. 1976. "Una Nueva Cultura del Agua". Colec. Nueva Cultura del Agua nº 1. Bakeaz. 131 págs.
- Martínez, L. M., Graf, S., Santana, E. & García, S. 2005. "Gestión y manejo del agua en la cuenca del Río Ayuquila". In *1er Congreso de Casos Exitosos de Desarrollo Sostenible en el Trópico*. Universidad Veracruzana y Centro de Investigaciones Tropicales (CITRO). p.p. 154.

- Martínez, R. L.A. 2002. “Estudio de contaminación del Río La Laja, Jalisco 1996-1998”. Tesis de grado. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Cs. Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara, Jalisco.
- Mckean, S. J. 1993. “Manual de análisis de suelos y tejido vegetal: Una guía teórica y práctica de metodologías”. CIAT. p. p1 03.
- Metha, L. 2000. “Water for the Twenty-First Century: Challenges and Misconceptions”. IDS Working Paper 111. Brighton: Institute of Development Studies. Disponible en: [https://entwicklungspolitik.unihoenheim.de/uploads/media/Water\\_for\\_the\\_Twenty-First\\_Century-idsworkingpaper\\_111\\_04.pdf](https://entwicklungspolitik.unihoenheim.de/uploads/media/Water_for_the_Twenty-First_Century-idsworkingpaper_111_04.pdf).
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. 2009. “Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua”. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1), 29-44.
- Mizyed, N. R. 2013. “Challenges to treated wastewater reuse in arid and semi-arid areas”. *Environmental science & policy*, 25, 186-195.
- Montilla, J., & Acosta, M. 2011. “Evaluación de la contaminación por cadmio y plomo en agua, suelo, y sedimento y análisis de impactos ambientales en la subcuenca del río balsillas afluente del río Bogotá”. *Trabajo de grado, Fac de Ing. Universidad de la Salle, Bogotá*.
- Montoya, M. A. 2016. “La CONAGUA en el Proyecto de Presupuesto de Egresos 2017: Entre el atropello brutal al presupuesto de las entidades federativas y la defensa de los intereses privados”. En [Agua.org.mx](http://www.agua.org.mx) consultado 14/10/2016. Disponible en: <http://www.agua.org.mx/noticias/not-nacionales/41550-la-conagua-en-el-proyecto-de-presupuesto-de-egresos-2017-entre-el-atropello-brutal-al-presupuesto-de-las-entidades-federativas-y-la-defensa-de-los-intereses-privados>

- Moriarty, P., Butterworth J. & Batchelor C. 2006. "La gestión integrada de los recursos hídricos y el subsector de agua y saneamiento doméstico". 2006. IRC International Water and Sanitation Centre.
- Navarro, F. A. E. 2007. "Evolución de la calidad de las aguas del Río Nexapa". En Memorias en extenso VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México. p. p 346-351
- Neri, R. E. 2008. "Efectos ambientales en la agricultura por el uso de aguas residuales del canal Chilhuacán, Atlixco, Pue". Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Campus Puebla. p.p. 185.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales".
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. "Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis".
- Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. "Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio".
- Norvell, W. A., Wu, J., Hopkins, D. G., & Welch, R. M. 2000. "Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium". *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2162-2168.

- Nguyễn, M. K., Pham Q. H., Nguyen C. V., Jon .P G. & Ingrid Ö. 2008. "Effects of biosolids application on soil chemical properties in peri-urban agricultural systems". VNU Journal of Science, Earth Sciences 24. p. p.202-212
- Núñez, G. A. L. 2015. "Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan Hidalgo". Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana. México. p. p. 90.
- Núñez, J. citado en Padilla, A. M. G., & Cerna, M. H. 2015. "Bioacumulación de plomo y cadmio en Brassica oleracea subsp. Capitata (L.) Metzg y Raphanus sativus L". *SCIÉENDO*, 16(2).
- Ocampo, F. I. 1994. "Importancia Social y económica de la pequeña producción hortícola, en un sistema de pequeña irrigación con aguas contaminadas. El caso del canal Santa Lucia Atlixco, Puebla". Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados Campus Puebla. p.p. 286.
- Ocampo, F. I. 2004. "Gestión del agua y sustentabilidad de los sistemas de pequeño riego. El caso del canal San Félix, Atlixco, México". Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba, España. p. p. 599.
- OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development. 1993. "Cuerpo de indicadores para revisiones de desempeño medioambiental de la OECD". OECD Environment Monographs N° 83. OECD/GD (93) 179. Paris. p. p. 39.
- OECD (Organization for Economic Co-Operation and Development. 2003. "Environmental Indicators: Development, measurement and use". Reference paper. p. p. 37.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2010. "Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio".

- ONU-Agua (Organización de las Naciones Unidas-Agua). 2010. "Preguntas más frecuentes sobre calidad del agua". Consultado 12/03/2016. Disponible en: [http://www.unwater.org/wwd10/downloads/WWD2010\\_FAQS\\_ES.pdf](http://www.unwater.org/wwd10/downloads/WWD2010_FAQS_ES.pdf)
- Osorio, M. 1982. "Diccionario de Ciencias Jurídicas. Políticas y Sociales". Buenos Aires, Editorial Heliasta.
- Oviedo, G. L. 2004. "La definición del concepto de percepción en psicología con base en la teoría Gestalt". *Revista de estudios sociales*, (18), 89-96.
- Palacios, O., & Aceves, E. 1994. "Instructivo para el muestreo, registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola". Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. *Ciencias Agrícolas. Montecillo, Estado de México*.
- Pare, O. M. F. L. 2010. "Relación campo-ciudad: elementos para agendas en común". ALASRU. México. p. p: 95-113.
- Peña C. M. SF. "Manejo integrado del recurso hídrico en la nueva Ley del Recurso hídrico de Costa Rica". Consultado el 18/04/2014 en: [http://huespedes.cica.es/gimadus/14-15/11\\_ley\\_de\\_recurso\\_hidrico.htm](http://huespedes.cica.es/gimadus/14-15/11_ley_de_recurso_hidrico.htm).
- Perevochtchikova, M. 2010. "Nueva cultura del agua en México: avances, limitaciones y retos". *Rev. Latinoam. Recur. Nat*, 6, 77-92.
- Pérez, D. J. P., Peña, C. E., López, C. R., & Hernández, T. I. M. 2016. "Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada". *Idesia (Arica)*, 34(1), 19-25.

Petrella, R. 2001. "The Water Manifiesto. Arguments for a World Water Contract". London: Zed Books.

Pilatti, M. A, Alesso, A., Felli, O., & Gasparotti, E. 2014. "Uso de lodos de depuradora sobre suelos de baja productividad en Santa Fe (Argentina)". *Fave. Sección ciencias agrarias*, 13(1), 63-80. Consultado el 12 de octubre de 2016, en: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1666-77192014000100006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1666-77192014000100006&lng=es&tlng=es).

Pino, M. E. 2001. "Análisis de indicadores de sostenibilidad ambiental y urbana en las Agenda 21 Local y Ecoauditorias municipales. El caso de las regiones urbanas europeas". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Barcelona).

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), CDB (Convenio sobre la Diversidad Biológica). 2000. "Decisiones adoptadas por la Conferencia de las Partes en el Convenio sobre la Diversidad Biológica en su quinta reunión". 165pp.

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), CDB (Convenio sobre la Diversidad Biológica). 2004. "Decisiones adoptadas por la Conferencia de las Partes en el Convenio sobre la Diversidad Biológica en su Séptima Reunión".

Polanco, C. 2006. "Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones". Consultado en: <http://www.redalyc.org/pdf/1694/169420986007.pdf>.

Prieto, D. 2008. "Riego con aguas salinas y aguas de drenaje, control de impacto de salinidad. Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y

Ambientalidad”, La Antigua (Guatemala), 11 al 14 de agosto de 2008, Red Riegos, CYTED y AECID

Prieto, M. J., González R. C. A.; Román, G. A. D.; Prieto G. F. 2009. “Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua” *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 10, núm. 1, 2009, pp. 29-44  
*Universidad Autónoma de Yucatán*, vol. 10, no 1, p. 29-44.

Restrepo, T. I. 2004. “Tendencias Mundiales en la Gestión de Recursos Hídricos: Desafíos para la Ingeniería del Agua”. *Ingeniería y competitividad*.

Reyes, R. S. 2014. “Normatividad Oficial mexicana en materia de tratamiento de aguas residuales como instrumento jurídico para la gestión integral de los recursos hídricos”, 2013. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de México. p.p. 143

Richards, L. A., Allison, L. E., Brown, J. W.; Hayward, H. E., Bernstein, L., Fireman, M., Pearson, G. A., Wilcox, L. V., Bower, C. A., Hatcher, J. T. & Reeve, R. C. 1954. “Diagnosis and improvement saline and alkali soils”. (L. A. Richards, editor). United States Salinity Laboratory Staff. United States Department of Agriculture. 172 pp.

Robledo, S. E., Espinosa, H. V., Maldonado T. R., Rubiños, P. J. E., Hernández, A. E., Ojeda, T. E., & Corlay C. L. 2010. “Sales solubles y metales pesados en suelos tratados con biosólidos”. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 16(2), 241-251. Consultado el 12 de octubre de 2016, en: <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.04.021>

Rodríguez, G. C. A. 2008. “La gestión del agua en los gobiernos locales de México. México, DF”. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, mayo (Documento de trabajo, núm. 41).

- Rodríguez, O. J. C., García, H. J. L., Valdez, C. R. D., Lara, M. J. L., Rodríguez, F. H., & Loredo, O. C. 2009. "Calidad agronómica de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales". *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 355-367.
- Rodríguez, S. M., Martínez, C., N., Romero, P., M. C., Del Río, L. A., & Sandalio, L. M. 2008. "Toxicidad del cadmio en plantas". *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Rogers, P. 1993. "The value of cooperation in resolving international river basin disputes". In *Natural Resources Forum* (Vol. 17, No. 2, pp. 117-131). Blackwell Publishing Ltd.
- Roncal, C. (citado en Padilla, A. M. G., & Cerna, M. H. 2015. "BIOACUMULACIÓN DE PLOMO Y CADMIO EN Brassica oleracea SUBSP. CAPITATA (L.) METZG. Y Raphanus sativus L". *SCIÉNDO*, 16(2).
- Rubio, C., Gutiérrez, A. J., Martín-Izquierdo, R. E., Revert, C., Lozano, G., & Hardisson, A. 2004. "El plomo como contaminante alimentario". *Revista de toxicología*, 21(2-3), 72-80.
- SAGARPA-FAO (Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2014. "Estudio sobre el envejecimiento de la población rural en México", Consultado 15/02/16 Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/programas2/evaluacionesExternas/Lists/Otros%20Estudios/Attachments/43/2%20Estudio%20sobre%20el%20envejecimiento%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20rural%20en%20M%C3%A9xico.pdf>.
- Sánchez, B. E., Camacho, E. M. A.; Rodríguez, L. A. & Ortega, E. H. M. 2013. "Physiological behavior of potato cv. Tollocan at diverse types of salinity". *Journal of Plant Studies*, 2: 120-134.

Santacruz, L. G. 2010. "Urban-rural perception of environmental problematics in the Valles-river basin, in the Huasteca potosina". *Textual Análisis del Medio Rural Latinoamericano*, (56), 157-172.

Santiago, M. A. 2013. "Papel de los constituyentes edáficos en la disponibilidad de metales pesados en suelos calcáreos de uso agrícola del área mediterránea. Enfoque químico y biológico. Role of soil constituents in heavy metal availability in calcareous agricultural soils in the Mediterranean area. Chemical and biological approaches. Rôle des constituants du sol dans la disponibilité d'éléments trace métalliques des sols calcaires agricoles de la région Méditerranéenne. Approche chimique et biologique". Universidad Complutense De Madrid. Facultad de farmacia. Departamento de Edafología. Tesis Doctoral p. p. 275.

SEDESOL (Secretaria de Desarrollo Social), 2013. "Catálogo de localidades". Consultado el 05/10/2014. Disponible en: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=21&mun=069>

SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2015. "Catálogo de localidades2. Consultado el 8/10/2016. Disponible en: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?buscar=1&tipo=nombre&campo=loc&valor=Santa+Ana+Coatepec&ent=21&mun=069><http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?buscar=1&tipo=nombre&campo=loc&valor=Atlixco&ent=21&mun=019>

Severiche, S. C. A., Casillo, B. M. E., & Acevedo, B. R. L. 2013. "Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básicos en aguas". Fundación Universitaria Andaluz Inca Garcilaso.

- Severiche S. C. A., & Barreto L. A. J. 2013. "Efecto de las lluvias sobre la calidad del agua en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano en periodo 2006-2009". Tesis de maestria. Universidad de Manizales. Colombia. p. p. 70
- Shepherd, G. 2004. "The Ecosystem Approach: Five Steps to Implementation". IUCN. Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- Sierra, J. E. 1998. "El municipio en América Latina y el Caribe: estructura, funcionamiento y estadísticas básicas". (No. 31141). Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Silva, G. S. E., Muñoz O. A., Isla B. M. L. e Infante G. S. 2002. "Contaminación ambiental en la región de Atlixco". En: 1. Agua Terra Latinoamericana. Universidad Autónoma Chapingo. 20(3): 243-251.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. 2008. "Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura". Una revision. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.
- Smith, R. D., & Maltby, E. 2003. "Using the ecosystem approach to implement the convention on biological diversity: key issues and case studies"(No. 2). IUCN.
- Solanes, M. 1998. "Manejo integrado del recurso agua, con la perspectiva de los principios de Dublín". *Revista de la CEPAL*.
- Solanes, M. 2001. "Entre la ética y la participación: desafíos del moderno derecho de aguas". In *Entre la ética y la participación: desafíos del moderno derecho de aguas*. CEPAL.
- Solanes, M., & Getches, D. 1998. "Prácticas recomendables para la elaboración de leyes y regulaciones relacionadas con el recurso hídrico". Inter-American Development Bank.

- Sauve, S., Hendershot, W., & Allen, H. E. 2000. "Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter". *Environmental Science & Technology*, 34(7), 1125-1131.
- Taborga, C. E. V., Castellón, R. V., & Taborga, O. Á. V. 2011. "*Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión*". (No. 0311). Universidad Privada Boliviana. Disponible en: <ftp://ftp.repec.org/opt/ReDIF/RePEc/iad/wpaper/0311.pdf>
- Tirado, Y. A. R., Wakida, F. T., Flores, E. G., & Corral, M. A. P. 2016. "Evaluación del impacto de la canalización del arroyo Alamar en la calidad de agua de su acuífero subyacente". *Ingeniería: Revista Académica de la Facultad de Ingeniería*, 19(1), 13-23.
- Trang, D. T.; Tuan, N. D; Van Der Hoek, W; Cam, P. D; Viet, D. H.; Luu, D. D.; Dalsgaard, A. 2006. "Skin problems among farmers engaged in wastewater-fed agriculture in Namdinh Province, Vietnam". In Raschid-Sally, Liqa; Jayakody, Priyantha (Eds.). *Proceedings of Workshop on Wastewater Reuse in Agriculture in Vietnam: Water Management, Environment and Human Health Aspects*, Hanoi, Vietnam, 4 May 2006. In English and Vietnamese. Hanoi, Vietnam: Agriculture Publishing House; Hanoi, Vietnam: Center for Participatory Irrigation Management (CPIM) of Vietnam Institute for Water Resources Research; Hanoi, Vietnam: International Water Management Institute (IWMI). pp.180-185.
- U. E. (Union Europea). 2014. "Normas de calidad ambiental". Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV%3A128180>
- UN (United Nations). 1992. "The Dublin Statement on Water and Sustainable Development". En "International Conference on Water and the Environment".

Dublin: UN Documents. Gathering a body of global agreements. Disponible en: <http://undocuments.net/h2o-dub.htm>.

- Vázquez, E., & Ruiz, J. 2013. "Análisis de la interacción suelo-planta-microorganismo en un suelo agrícola del Valle del Mézquital, Hidalgo adicionado con biosólido". *Ciencias Agropecuarias Handbook. Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos*, 1. ECORFAN. p.p 1-12. Disponible en: <file:///C:/Users/lvet/Downloads/Dialnet-CienciasAgropecuariasHandbook-561050.pdf>
- Veliz, E. L., Llanes, O. J. G., Asela, F. L., & Bataller V. M. 2009. "Reúso de aguas residuales domésticas para riego agrícola". Valoración crítica. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 40(1).
- Victory, C. 1998. "Los gobiernos locales en la región latinoamericana". En: Informe del Curso-Taller sobre Gobierno Municipal y Desarrollo Local-LC/IP/R. 203-1998-p. 17-25.
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. 2010. "Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments". *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(3), 268-292.
- Winpenny, J., Heinz, I., & Koo-Oshima, S. 2013. "Reutilización del Agua en Agricultura: Beneficios Para Todos". FAO Informe sobre Temas hídricos: Rome, Italy, 35.
- Wells, E. C., Zarger, R. K., Whiteford, L. M., Mihelcic, J. R., Koenig, E. S., & Cairns, M. R. 2016. "The impacts of tourism development on perceptions and practices of sustainable wastewater management on the Placencia Peninsula, Belize". *Journal of Cleaner Production*, 111, 430-441.

Westler, P. 2003. "Boundaries of Consent: Stakeholder Representation in River Basin Management in Mexico and South Africa". *World Development*. Vol. 31. No. 5. Pág. 797 – 812. Great Britain: Pergamon.

Wetzel, R. G. 1981. "Limnología". Barcelona. Editorial Omega. p. p. 679.

WHO (World Health Organization). 2008. "*Guidelines for drinking-water quality incorporating 1st and 2nd addenda*". 3rd ed., Vol. 1: *Recommendations*. Geneva: WHO.

WHO (World Health Organization). 2013. "Water quality and health strategy 2013–2020". *World Health Organization, Geneva, Switzerland*.

Young, R. A. 1986. "Why are there so few transactions among water users?" *American Journal of Agricultural Economics*, 68(5), 1143-1151.