



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE INGENIERÍA
CAMPO DE CONOCIMIENTO: VULNERABILIDAD Y RESPUESTA AL CAMBIO
GLOBAL

“EVALUACIÓN DEL SISTEMA HÍDRICO PRODUCTIVO DEL VALLE DEL
MEZQUITAL: COSTOS Y BENEFICIOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL”

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

PRESENTA:
MARÍA GUADALUPE MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DRA. AMY MICHELLE LERNER
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
DRA. ANA CECILIA ESPINOSA GARCÍA
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
DR. RODOLFO OMAR ARELLANO AGUILAR
FACULTAD DE CIENCIAS

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/392/17
Asunto: Asignación de Jurado**

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

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su trigésima sesión del 14 de noviembre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **MARTÍNEZ HERNÁNDEZ MARÍA GUADALUPE** con número de cuenta **306613429** con la tesis titulada "Evaluación del sistema hídrico productivo del Valle del Mezquital: costos y beneficios del tratamiento del agua residual", bajo la dirección de la Dra. Alma Concepción Chávez Mejía.

PRESIDENTE:	DR. RODOLFO OMAR ARELLANO AGUILAR
VOCAL:	DR. DANIEL ALFREDO REVOLLO FERNÁNDEZ
SECRETARIO:	DRA. ANA CECILIA ESPINOSA GARCÍA
SUPLENTE 1:	DRA. AMY MICHELLE LERNER
SUPLENTE 2:	DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 8 de enero de 2018.


Dra. Marisa Mazari Hiriart
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

Agradecimientos

A la Coordinación del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por permitirme ingresar a la maestría y por las facilidades otorgadas para llevar a cabo un proceso de graduación oportuno.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado por la beca UNAM otorgada en el segundo semestre de la maestría y al CONACYT por el apoyo económico otorgado durante un año de la maestría.

A mi asesora, la Dra. Alma Chávez por el apoyo, comprensión e impulso para elaborar un buen trabajo de investigación. Agradezco infinitamente los conocimientos compartidos que han contribuido a mi formación interdisciplinaria y los cuales me permitirán ser una mejor profesionista.

A los miembros de mi comité tutorial, Dra. Amy Lerner, Dra. Ana Cecilia Espinosa y Dr. Omar Arellano, por sus valiosas aportaciones para el proyecto de investigación, buscando siempre enriquecer mi formación con sus conocimientos y trabajo en equipo.

Al Dr. Daniel Revollo como miembro del jurado y colega, por incentivar la expresión de mis conocimientos como economista.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por brindarme un espacio para desarrollar mi tesis y conocer personas con quienes pude intercambiar diferentes puntos de vista y trabajo en equipo.

A la UNAM, porque siempre será mi casa y me siento muy orgullosa de haber formado parte en dos ocasiones de la máxima casa de estudios en México.

Agradecimientos a título personal

A mis padres, Socorro Hernández y Rafael Martínez por educarme para lograr siempre mis metas y apoyarme para hacer de mí la persona que soy ahora.

A mis hermanos Rocío, Norma y Nicolás por apoyarme siempre en mis decisiones.

A mi sobrina Karla por siempre estar para mí y ayudarme con el trabajo de campo de la investigación.

A mis cuñados Alfredo y Antonio y mis sobrinos Julio y Luis, solo por ser mi familia.

A mi grupo de amigos “Vulnerables”, Alex, Mari, Ubaldo, Evelyn y Toño por haber compartido momentos inolvidables de compañerismo y ayuda mutua buscando siempre apoyarnos dentro de la maestría.

A mis amigas Raiza y Paulina por ser mi apoyo incondicional durante estos dos años, fomentar mi crecimiento personal y demostrarme que siempre puedo contar con ellas. Las admiro y son para mí una fuente de inspiración.

A mi amiga Fernanda por sus buenos consejos y reflexiones.

A los becarios del Grupo de Reúso y Tratamiento del Instituto de Ingeniería Ulises, Lura, Elizabeth y Noé por compartir conmigo sus conocimientos y aclarar mis dudas.

A la familia Valdez Velazquez y a Daniel por el apoyo moral brindado durante este tiempo y para el trabajo de campo en las localidades del Valle del Mezquital.

Y, especialmente, a mi novia Karla Valdez, por ser mi soporte durante más de la mitad del proceso que llevó mi maestría, por ayudarme con el trabajo de campo y por su compromiso con mi desarrollo personal y profesional.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS	13
GLOSARIO.....	15
RESUMEN	17
INTRODUCCIÓN	19
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	24
HIPÓTESIS.....	24
OBJETIVOS	24
General.....	24
Específicos	24
ALCANCES	25
JUSTIFICACIÓN.....	27
CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES	29
1.1.- El Sistema Metropolitano de Drenaje y el descarga de agua residual sin tratar al Valle del Mezquital.....	30
1.1.1.- El Sistema Metropolitano de Drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).....	30
1.1.2.- Características del Valle del Mezquital y transformación de la zona a partir del riego con agua residual sin tratar.....	34
1.2.- Edafología e hidrogeología del Valle del Mezquital y su relación con el tratamiento suelo-acuífero (SAT).	38
1.2.1.- Clasificación de los suelos del Valle del Mezquital.	38
1.2.2.- Tratamiento suelo-acuífero (SAT por sus siglas en inglés).....	39
1.2.3.- Clasificación de los acuíferos del Valle del Mezquital.....	41
1.3.- Parámetros de calidad del agua normados para uso rural, urbano y consumo humano y problemas relacionados con la pérdida de la calidad de la misma.	42
1.3.1.- Parámetros físicos	42
1.3.2.- Parámetros químicos.....	43
1.3.3.- Parámetros microbiológicos.....	43
1.4.- El tratamiento de agua residual en la ZMVM y el megaproyecto de la PTAR Atotonilco en el Valle del Mezquital.....	47

1.4.1.- La PTAR Atotonilco como proyecto de saneamiento integral del Valle del Mezquital.....	49
1.5. Percepción de riesgo ambiental y racionalidad.....	55
1.5.1.- Percepción de riesgo ambiental	55
1.5.2.- Racionalidad y percepción de riesgo	56
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LOS COSTOS Y BENEFICIOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA PTAR ATOTONILCO.....	58
2.1.- Metodología de parámetros	60
2.1.1.- Historia, productividad y amenazas sanitarias del Valle del Mezquital	60
2.1.2.- Caracterización de suelo en el Valle del Mezquital.....	60
2.1.3.- Elaboración de índices de calidad de agua residual sin tratar, acuíferos y agua residual tratada.	61
2.1.4.- Balance de masas en los gastos que tratará la PTAR y los que no serán tratados tanto en época de lluvia como de estiaje.	65
2.1.5.- Comparación de los índices de calidad del agua residual sin tratar con los índices del agua residual tratada por la PTAR y del acuífero.	68
2.2.- Metodología de entrevistas.....	69
2.2.1.- Entrevistas con los jefes de operaciones de los distritos de riego 003, 100 y 112 para conocer la historia y operación de cada uno.....	69
2.2.2.- Sondeo a través de 29 entrevistas con preguntas cerradas y abiertas a agricultores usuarios y no usuarios de agua residual sin tratar.	70
2.3. Análisis de los resultados.....	71
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	79
3.1.- Análisis histórico, de la productividad y amenazas sanitarias del Valle del Mezquital	79
3.1.1.- Historia y operación de los DR003, DR100 y DR112.....	79
3.1.2.- Caracterización ambiental de los suelos	84
Nutrientes, materia orgánica y salinidad.....	84
Microorganismos y metales pesados.....	86
3.1.3.- Productividad de los DR003, DR100 y DR112.....	86
3.1.4.- Identificación de amenazas sanitarias para la salud pública del Valle del Mezquital.....	89
3.2.- Índices de calidad para el agua residual sin tratar	91
3.2.1.- Microorganismos	91
3.2.3.- Materia orgánica	94

3.2.4.- Nutrientes.....	96
3.2.5.- Salinidad	97
3.3.- Caso de estudio: Costos y beneficios ambientales, económicos y de salud que tendrá el tratamiento del agua residual que tendrá el megaproyecto PTAR Atotonilco.	100
3.3.1.- Constituyentes que removerán la PTAR Atotonilco (TPC y TPQ)	101
Materia orgánica.....	101
Nutrientes	102
Microorganismos.....	103
Metales pesados.....	105
Salinidad.....	106
3.3.2.- Agua residual que no será tratada y sus implicaciones.....	107
3.4.- Índices de calidad para el agua del acuífero	114
3.4.1.- Nutrientes.....	115
3.4.2.- Microorganismos	116
3.4.3.-Metales pesados	118
3.4.4.- Salinidad	119
3.5.- Resumen de los impactos ambientales, sanitarios y económicos del reúso y recarga de agua residual en el Valle del Mezquital.	121
3.5.1.- Impactos del empleo del agua residual sobre el suelo	123
3.5.2.- Impactos del empleo del agua residual en el acuífero	127
3.5.3.- Comparación de los índices de agua residual sin tratar con el agua residual tratada por la PTAR Atotonilco y la remoción del SAT.	130
3.5.4.- Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en los rubros ambiental, sanitario y económico del tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital... ..	134
3.6.- Percepción del sistema hídrico productivo por parte de los agricultores del Valle del Mezquital.	138
3.7.- Discusión	142
Costos y beneficios ambientales, sanitarios y productivos percibidos y reales del tratamiento de agua residual.....	142
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	149
4.1.- Conclusiones.....	149
4.2.- Recomendaciones	151
CAPÍTULO 5. REFERENCIAS	152
ANEXOS	158

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Estructura de los Antecedentes de la investigación	29
Figura 2. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).	30
Figura 3. Dren general del Sistema de Drenaje Profundo del Valle de México en el Valle del Mezquital.	33
Figura 4. Transporte del agua residual generada en el valle de México y envío al Valle de Tula en los distritos de riego.....	35
Figura 5. Ecosistema de matorral xerófilo en el municipio de Tetepango, Hgo.	36
Figura 6. Proceso del “Tratamiento suelo-acuífero” (SAT). Soluciones a la contaminación de suelos y acuíferos.....	39
Figura 7. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTAR)..	49
Figura 8. Procesos de tratamiento llevados a cabo por medio de la PTAR Atotonilco.	54
Figura 9. Estructura metodológica de la investigación.....	59
Figura 10. Estructura del Distrito de Riego Tula (003).	81
Figura 11. Estructura del Distrito de Riego Alfajayucán (100)..).	82
Figura 12. Estructura del Distrito de Riego 112.....	83
Figura 13. Principales cultivos del Valle de Mezquital (Miles de Ton/Año) (2014).	88
Figura 14. Precios medios rurales (PMR) de los principales cultivos del Valle de Mezquital 1997-2014 (2017)	89
Figura 15. Índices de coliformes fecales en agua residual sin tratar.	91
Figura 16. Índices de Huevos de Helminto en agua residual sin tratar.	92
Figura 17. Índices de metales pesados en agua residual sin tratar	94
Figura 18. Índices de materia orgánica en agua residual sin tratar.....	95
Figura 19. Índices de nutrientes para el agua residual sin tratar: Fósforo y Nitrógeno.....	97
Figura 20. Índices de salinidad en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008	99
Figura 21. Aportación de materia orgánica en ambas temporadas (Kg/ha al año).....	102
Figura 22. Aportación de nutrientes en ambas temporadas (Kg/ha al año).....	103
Figura 23. Contenido de coliformes fecales posterior al tratamiento en temporada de lluvia y estiaje (Unidades logarítmicas)	104
Figura 24. Carga de huevos de helminto en ambas temporadas posterior al tratamiento (HH/ha al año).	105
Figura 25. Carga de metales pesados en ambas temporadas posterior al tratamiento (Kg/ha al año).	106
Figura 26. Concentración de salinidad en ambas temporadas posterior al tratamiento (Kg/ha al año).	107
Figura 27. Aportación de materia orgánica y nutrientes en ambas temporadas en gasto no tratados.	109
Figura 28. Concentración de coliformes fecales en los gastos no tratados en ambas temporadas.....	110

Figura 29. Contenido de huevos de helminto en los gastos no tratados en ambas temporadas (HH/ha al año)..	111
Figura 30. Carga de metales pesados en los gastos no tratados en ambas temporadas (Kg/ha al año).	112
Figura 31. Carga de sales en los gastos no tratados en ambas temporadas (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008.	114
Figura 32. Índices de nutrientes en acuífero	116
Figura 33. Índices de microorganismos en acuífero.	117
Figura 34. Índices de metales pesados en acuífero	119
Figura 35. Índices de salinidad del acuífero	120
Figura 36. Diagrama de los costos y beneficios del sistema hídrico-productivo del Valle del Mezquital con y sin PTAR	147

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Población en las delegaciones de la Ciudad de México y municipios conurbados.	31
Tabla 2. Distribución del agua residual de la ZMVM (Década de los noventa)	33
Tabla 3. Tipos de suelos estudiados en el Valle del Mezquital.....	38
Tabla 4. Principales subacuíferos del Valle del Mezquital, balance hídrico y profundidad	42
Tabla 5. Aspectos técnicos de la PTAR Atotonilco	50
Tabla 6. Matriz de parámetros considerados para el cálculo del índice, agua residual sin tratar. $\sqrt{\dots}$	62
Tabla 7. Matriz de parámetros considerados para el cálculo del índice en el agua de los acuíferos (Datos obtenidos de Lesser, 2011) δ	63
Tabla 8. Ejemplo de balance de masa de los SST en temporada de estiaje para el flujo de 52 m ³ /s (Concentración mínima en el influente)	66
Tabla 9. Remoción de parámetros de interés con la tecnología lodos activados.....	67
Tabla 10. Balance de masas de SST en temporada de lluvia y estiaje (TPC) para el flujo tratado de 23 m ³ /s (Carga mínima del efluente)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. Remoción de los parámetros de interés en el tratamiento fisicoquímico por medio de dosis de 20-25 mg/L de Cloruro férrico (FeCl ₃), agua residual tratada del Emisor Central	68
Tabla 12. Localidades clave para las entrevistas	71
Tabla 13. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro de salud	76
Tabla 14. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro productivo	77
Tabla 15. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro ambiental.....	77
Tabla 16. Caracterización del suelo tipo Feozem en el Valle del Mezquital	85
Tabla 17. Variables relacionadas con la productividad de los Distritos de Riego en el Valle del Mezquital	87
Tabla 18. Tolerancia de los cultivos del Valle del Mezquital a la salinidad	98
Tabla 19. Inversión, Costos de Operación y de Mantenimiento de la PTAR Atotonilco, 2008 (Miles de Millones de Pesos)	100
Tabla 20. Requerimiento de nitrógeno y fósforo para el cultivo maíz en el Valle del Mezquital.....	108
Tabla 21. Impactos ambientales, económicos y sociales del reúso y recarga de agua residual en el Valle del Mezquital.....	122
Tabla 22. Acumulación de cadmio, plomo, cobre y zinc en suelos irrigados con agua de con agua residual sin tratar.....	124
Tabla 23. Prevalencia de parasitosis intestinales en el Valle del Mezquital por grupos de edad y exposición	125
Tabla 24. Índices de calidad del agua sin tratar (ARC), acuífero y agua residual tratada..	133
Tabla 25. Costos y beneficios monetarios en materia ambiental del tratamiento del agua residual	135

Tabla 26. Costos y beneficios monetarios en materia de salud del tratamiento del agua residual	136
Tabla 27. Costos y beneficios monetarios en materia económica del tratamiento de agua residual	137
Tabla 28. Características de los entrevistados	138
Tabla 29. Resultados de las entrevistas semiestructuradas.....	141

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

\$/Ton	Pesos por tonelada
$\mu\text{S}/\text{cm}^3$	Microsiemens por centímetro cúbico
Al^{3+}	Aluminio
ARC	Agua Residual Cruda
As^-	Arsénico
B	Boro
Ba	Bario
Ca^{2+}	Calcio
Cd	Cadmio
CF	Coliformes fecales
Cl^-	Cloruros
CN^-	Cianuros
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
COT	Carbono Orgánico Total
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DR003	Distrito de Riego Tula
DR100	Distrito de Riego Alfajayucán
DR112	Distrito de Riego Ajacuba
Fe^{2+}	Hierro
HCO_3^-	Bicarbonato
HH	Huevos de helminto
INAFED	Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
K^+	Potasio
Kg/ha	Kilogramos por hectárea
LFDMA	Ley Federal de Derechos en Materia de Agua
LMP	Límites Máximos Permisibles
m^3/s	Metros cúbicos por segundo
$\text{M}^3/\text{temporada}$	Metros cúbicos por temporada
Mg^{2+}	Magnesio
Mn	Manganeso
N	Nitrógeno
Na^+	Sodio
NH_4^+	Amonio
NO_2^-	Nitritos
NO_3^-	Nitratos
NOM-001-SEMARNAT-1996	Norma Oficial Mexicana que establece los LMP de contaminantes en descargas de aguas residuales en bienes nacionales.

NOM-004-SEMARNAT-2002	Norma Oficial Mexicana para aprovechamiento y disposición final de lodos y biosólidos.
NOM-127-SSA1-1994	Norma Oficial Mexicana de Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
OMS	Organización Mundial de la Salud
P	Fósforo
PAOT	Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial
Pb⁴⁺	Plomo
PMR	Precios Medios Rurales
PNH	Programa Nacional Hídrico
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SAT	Soil Aquifer Treatment (Tratamiento Suelo-Acuífero)
SDT	Sólidos Disueltos Totales
SIIEH	Sistema Integral de Información del Estado de Hidalgo
SS	Secretaría de Salud
SST	Sólidos Suspendidos Totales
TEO	Túnel Emisor Oriente
Ton/año	Toneladas al año
Ton/ha	Toneladas por hectárea
Ton/m³	Toneladas por metro cúbico
TPC	Tren de Proceso Convencional
TPQ	Tren de Procesos Químicos
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México
Zn²⁺	Zinc

GLOSARIO

Acuífero: Formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (C. de Diputados, 2017).

Agua residual: Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (CONAGUA, Normas oficiales, 2016).

Agua residual cruda: Son las aguas residuales sin tratamiento (Ibidem, 2016).

Agua residual tratada: Son aquellas que, mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en servicios al público (Ibidem, 2016).

Bienes nacionales: Son los bienes cuya administración está a cargo de la Comisión Nacional del Agua en términos del artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales (Ibidem, 2016).

Carga contaminante: Cantidad de un contaminante expresada en unidades de masa por unidad de tiempo, aportada en una descarga de aguas residuales (Ibidem, 2016).

Cuerpo receptor: Son las corrientes, depósitos naturales de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas cuando puedan contaminar el suelo o los acuíferos (Ibidem, 2016).

Descarga: Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación (Ibidem, 2016).

Efluente: Conjunto de líquidos que salen de un sistema industrial (RAE, 2017).

Embalse artificial: Vaso de formación artificial que se origina por la construcción de un bordo o cortina y que es alimentado por uno o varios ríos o agua subterránea o pluvial (CONAGUA, Normas oficiales, 2016).

Influente: Conjunto de líquidos que entran a un sistema.

Límite Máximo Permissible (NOM-001-SEMARNAT-1996): Valor o rango asignado a un parámetro, el cual no debe ser excedido en la descarga de aguas residuales (CONAGUA, Normas oficiales, 2016) .

Límite Máximo Permissible (NOM- 127-SSA1-1994): Concentración o contenido máximo o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor (Secretaría de Salud, 2017)

Río: Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar (CONAGUA, Normas oficiales, 2016) .

Suelo: Cuerpo receptor de descargas de aguas residuales que se utiliza para actividades agrícolas (CONAGUA, Normas oficiales, 2016) .

Sistema hídrico-productivo: Conjunto de interacciones ambientales, productivas, sanitarias e institucionales ocasionadas por medio del descarga de agua residual cruda procedente de la ZMVM al Valle del Mezquital, lo cual ha derivado en el desarrollo de la agricultura de riego en esta zona.

Uso en riego agrícola: La utilización del agua destinada a la actividad de siembra, cultivo y cosecha de productos agrícolas y su preparación para la primera enajenación, siempre que los productos no hayan sido objeto de transformación industrial (Ibidem, 1996).

RESUMEN

El reúso del agua residual sin tratar en el Valle del Mezquital por un periodo de 97 años es un problema que ha ocasionado diversos impactos ambientales, sanitarios y productivos en esta zona semiárida, los cuales pueden considerarse positivos y negativos. Dentro de los impactos positivos más representativos destaca la formación del sistema hídrico-productivo a través del impulso de la agricultura de riego, como consecuencia del aprovechamiento del agua residual sin tratar en el riego agrícola. Mientras que uno de los impactos negativos más importantes son las amenazas para la salud de la población expuesta a este recurso hídrico por enfermedades asociadas con microorganismos e Insuficiencia Renal Crónica (IRC) por la exposición a metales pesados. Actualmente, se encuentra en pruebas técnicas la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTAR), el proyecto de saneamiento más grande de América Latina y que posiblemente generará nuevos impactos ambientales, sanitarios y productivos en el Valle del Mezquital. El objetivo de la presente investigación fue evaluar y cuantificar los costos y beneficios ambientales, productivos y sanitarios que ocasionará el tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital por medio de la PTAR Atotonilco. Lo anterior se llevó a cabo mediante la determinación de índices de calidad del agua elaborados para 23 parámetros regulados en la normativa nacional y a su vez seccionados en grupos de materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y salinidad los cuales se incorporaron en matrices de agua residual sin tratar, agua residual tratada y acuífero en las temporadas de lluvia y estiaje para evaluar la relación de las concentraciones de cada uno con los Límites Máximos Permisibles (LMP). Se elaboró también, un balance de masas de las concentraciones anuales de estos parámetros en las tres matrices para conocer el porcentaje de remoción del tratamiento natural suelo-acuífero (SAT) y el de la PTAR. Se aplicó un sondeo a partir de 29 entrevistas estructuradas a agricultores que tienen y no tienen contacto con el agua residual en diferentes comunidades del Valle del Mezquital para conocer la percepción de los costos y beneficios por el tratamiento del agua residual. Con base en los métodos anteriores se realizaron estimaciones financieras de los costos y beneficios reales y percibidos. De manera particular, 1) se identificaron las amenazas hacia la salud de la población como consecuencia del reúso de agua residual en la agricultura de riego por medio de tasas de morbilidad por enfermedades entéricas y mortalidad por IRC, así como la estimación de costos y beneficios financieros en materia de salud en la zona antes y después del tratamiento; y; 2) se hizo un contraste entre las percepciones de los agricultores sobre los costos y beneficios del tratamiento del agua residual con los reales calculados por medio de los datos numéricos obtenidos y los resultados de las 29 entrevistas estructuradas. Los resultados demostraron que la PTAR tratará el 67% del flujo anual de descarga en el Valle del Mezquital correspondiente a

914.5 millones de m³, por lo cual el saneamiento no será integral, ya que se desconoce cómo se llevará a cabo la gestión del 33% del flujo restante correspondiente a 362.6 millones de m³ al año. En relación con los costos de salud, el porcentaje de remoción promedio de microorganismos y metales pesados sería de 40%, en consecuencia, los costos en salud se reducirían de \$362.8 millones de pesos a \$217.6 millones de pesos. En relación con los costos en la productividad, habría una reducción promedio de 61% de materia y nutrientes, por lo cual, los costos se incrementarían de \$4000 por la producción de cuatro hectáreas a \$6440. En cuanto a la percepción del saneamiento, de los agricultores entrevistados (21 de 29), tienen conocimiento sobre la existencia de este proyecto de saneamiento, 20 de 29 consideran que este recurso es absolutamente necesario para la agricultura y que posiblemente la PTAR traiga consigo una reducción de la productividad.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible se define como “el camino a satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades” (ONU, Informe de Burdttland "Nuestro Futuro Común", 1987) . Para alcanzar el desarrollo sostenible es fundamental la armonización de tres elementos básicos, el crecimiento económico, la inclusión social y la protección del medio ambiente. Estos elementos están interrelacionados y son todos esenciales para el bienestar de la sociedad y el medio ambiente (UNESCO, Organización de Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura, 2017). El desarrollo sostenible es actualmente una de las prioridades de la Organización de Naciones Unidas (ONU), por lo cual los 193 países miembros deben incorporar este tópico dentro de sus agendas políticas públicas para que este tipo de desarrollo se lleve a cabo.

El manejo y gestión de recursos vitales para el ser humano como lo es el agua debe ser una meta considerada para alcanzar el desarrollo sostenible, ya que la oferta de agua dulce es limitada y debe considerarse el recurrir al tratamiento y reúso de la misma para la satisfacción de la demanda. La ONU tiene dentro de sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ONU, Objetivos del Desarrollo Sostenible, 2017) la meta no. 6 que establece “Agua limpia y saneamiento para garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”. Esta meta contiene dentro de sus postulados la mejora de la calidad del agua residual, a través de la reducción de la contaminación, reducción del vertimiento y la minimización de productos químicos y materiales peligrosos. La finalidad de esta meta es reducir a la mitad el porcentaje de agua residual sin tratar y aumentar la reutilización de la misma para reducir los riesgos en materia de salud a nivel mundial.

De acuerdo con este ODS, el reúso de agua en zonas urbanas y rurales es necesario para disminuir la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos, los cuales proporcionan el 50% del agua potable para la población mundial y satisfacen la demanda de agua (UNESCO, Agua para un mundo sostenible: Datos y cifras, 2015). El reúso es preciso para la agricultura ya que es una de las actividades económicas que demandan mayor cantidad de agua, al presente se riegan 20 millones de hectáreas con agua residual sin tratar o parcialmente tratada (FAO, 2013) . El riego con agua residual sin tratar es útil para la agricultura, pero también representa riesgos para la salud pública (Jiménez Cisneros & Asano, 2008). Por lo anterior, es necesario contar con marcos regulatorios sólidos que establezcan Límites Máximos

Permisibles (LMP) adecuados para los diferentes parámetros¹ de calidad del agua para riego que reduzcan el riesgo por el reúso de agua residual sin tratar.

En México, el Valle del Mezquital es una de las zonas más contaminadas por el reúso de agua residual sin tratar en riego, ya que recibe cerca del 70% del drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (BGS, CNA, & LSHTM, 1998). Esta práctica se ha llevado a cabo por un periodo de 97 años (1920-2017) a través del Sistema de Drenaje Profundo de la ZMVM y abastece tres Distritos de Riego, Tula (DR003) y Alfajayucán (DR100) y Ajacuba (DR112). Lo anterior representa, una dualidad antagónica entre productividad agrícola y salud, por lo cual el reúso en riego puede considerarse insostenible, ya que satisface a la agricultura, pero representa amenazas sanitarias para los usuarios.

Una amenaza puede considerarse el sinónimo de un peligro y es un evento raro o extremo en el ambiente natural o humano que afecta adversamente la vida humana o sus actividades a tal grado de causar un desastre (Wilches-Chaux, 1989). Una amenaza no se considera lo mismo que un riesgo, ya que el riesgo puede definirse como la probabilidad de que un evento negativo ocurra y requiere ser evaluado experimentalmente por medio de variables como la exposición de cierta población hacia una amenaza. Las amenazas pueden ser biológicas e incluir microorganismos como los responsables de enfermedades epidémicas ya que representan un riesgo para la salud humana (Blaikie, 1996). Por otro lado, la percepción de riesgo es el cómo las personas identifican subjetivamente el estar expuestas a cierta amenaza o peligro.

Como consecuencia de la creciente situación de contaminación en el Valle del Mezquital, en el año 2012, el Gobierno Federal decidió la construcción del megaproyecto de saneamiento *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Salto (PTAR)*, hoy conocida como PTAR Atotonilco. El objetivo de este proyecto es tratar el agua residual que llega a la zona del Valle del Mezquital de acuerdo con el Programa Nacional Hídrico (PNH), el cual considera al saneamiento como prioridad para la sostenibilidad hídrica. La PTAR se encuentra actualmente en arranque. (CONAGUA, Memoria Documental de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco., 2012). por lo cual es necesario conocer los

¹ Un parámetro es un dato o factor que se toma como necesario para analizar o valorar una situación (RAE, 2017).

posibles efectos en el mediano-largo plazo con la puesta en marcha de dicho proyecto y la mejora de la sostenibilidad en la zona.

El presente trabajo analiza el impacto que tendría la PTAR Atotonilco en la zona del Valle del Mezquital en materia ambiental, productiva y sanitaria. Se consideran estos tres elementos ya que concuerdan con los propuestos por la ONU para alcanzar el desarrollo sostenible, crecimiento económico (productividad), inclusión de la sociedad (salud) y protección del medio ambiente (saneamiento). La investigación tiene dos ejes, en el primero se establece una imagen presente del sistema hídrico-productivo del Valle del Mezquital al analizar los impactos ambientales, productivos y sanitarios del empleo de agua residual sin tratar. El segundo eje se centra en el caso de estudio correspondiente a la estimación de los costos y beneficios ambientales, productivos y sanitarios que tendrá el tratamiento del agua residual. De esta manera se tiene la imagen actual de este sistema hídrico-productivo y la proyección de lo que podría ser posterior al tratamiento.

La tesis está organizada en cinco capítulos. El *Capítulo 1* corresponde a los antecedentes de la investigación, donde se expone brevemente la historia del sistema hídrico-productivo por medio del reúso de agua residual sin tratar proveniente del Sistema de Drenaje profundo de la ZMVM. Se describen las características de los suelos y acuíferos del Valle del Mezquital, ya que una consecuencia del reúso es el Tratamiento Suelo-Acuífero (Soil-Aquifer Treatment: SAT). Se describe brevemente la situación del tratamiento de agua en la ZMVM y el megaproyecto de la PTAR Atotonilco para el saneamiento integral del Valle del Mezquital. Por lo anterior, se exponen también algunos parámetros que se utilizan para evaluar la calidad del agua para uso rural, urbano y consumo humano, ya que para cada uso se tienen Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos nacional e internacionalmente.

En el *Capítulo 2* se describe la metodología utilizada en la investigación para evaluar los costos y beneficios reales y percibidos, la metodología se divide en dos, metodología de parámetros y metodología de entrevistas. Dentro de la metodología de parámetros se elaboraron índices² de calidad para agua residual sin tratar, agua residual tratada e índices de calidad del agua del acuífero considerando 23 parámetros relacionados con la contaminación por seccionados en materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y sales. Se realizaron balances de masas de los mismos parámetros de calidad del

² Un índice es un indicio o señal de algo (RAE, 2017)

agua en agua residual sin tratar y tratada por la PTAR y se estimaron algunos costos y beneficios monetarios en los rubros ambiental, productivo y sanitario.

En cuanto a la metodología de entrevistas, se realizaron entrevistas semiestructuradas a los jefes de operaciones de los Distritos de Riego del Valle del Mezquital DR003 (Tula), DR100 (Alfajayucán) y DR112 (Ajacuba), para conocer la historia del sistema hídrico-productivo a partir de sus conocimientos sobre la zona. También se realizó un sondeo por medio de 29 entrevistas con preguntas cerradas y abiertas a agricultores del Valle del Mezquital, usuarios y no usuarios de agua residual sin tratar, para conocer su percepción sobre el sistema hídrico-productivo en relación con tres tópicos: productividad, riesgo sanitario y saneamiento. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los costos y beneficios reales (obtenidos de la metodología cuantitativa) y los percibidos (obtenidos de las entrevistas) en relación con los tópicos antes mencionados.

En el *Capítulo 3* se detallan los resultados y la discusión del trabajo. Primeramente, se encuentra un análisis histórico del sistema hídrico-productivo del Valle del Mezquital, el cual se complementó con las entrevistas aplicadas a los jefes de operaciones de los distritos de riego antes mencionados. Dentro de esta sección histórica se analizaron también con base en literatura las características de los suelos de la zona, la productividad agrícola y el riesgo sanitario. Posterior al análisis histórico, se realizó el análisis del agua residual sin tratar por medio de índices de calidad para agua residual sin tratar considerando los 23 parámetros de calidad del agua antes mencionados. El agua residual sin tratar representa la situación actual en las tres esferas de la sostenibilidad: ambiental, social (sanitaria) y económica (productiva) de la zona del Valle del Mezquital.

Después de analizar el agua residual se procedió al análisis del caso de estudio: los costos y beneficios del tratamiento del agua residual por medio de la PTAR Atotonilco. En esta sección los resultados se obtuvieron por medio de un balance de masas de los 23 parámetros utilizados para evaluar el agua residual sin tratar, porcentajes de remoción de la PTAR e índices de calidad del agua residual tratada. En cuanto se analizó el caso de estudio se procedió a evaluar la calidad del acuífero de la misma manera que se hizo con la calidad del agua residual sin tratar. Para finalizar este análisis se resumieron los impactos del agua

residual sin tratar y se compararon los índices de calidad del agua residual sin tratar, del agua residual tratada y del acuífero.

Con base en todos los resultados anteriores se estimaron costos y beneficios monetarios que tendría el tratamiento del agua residual en la zona, estos datos obtenidos, se consideraron dentro de la investigación los datos reales. Consecuentemente, se presentaron los datos obtenidos de las entrevistas a los agricultores del Valle del Mezquital con base en tres temas principales: productividad, percepción de riesgo sanitario y saneamiento, de esta manera se obtuvieron los costos y beneficios percibidos. Al final de esta sección la discusión giro en torno al contraste de los costos y beneficios percibidos con los costos y beneficios reales. En el *Capítulo 4* se encuentran las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación. El *Capítulo 5* contiene las referencias utilizadas; y, al final se encuentran los anexos.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuáles serán los costos y beneficios en materia ambiental, de salud y productividad agrícola que tendrá el tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital con base en el saneamiento integral de la zona?

HIPÓTESIS

Hipótesis nula (H0): El tratamiento del agua residual sin tratar reducirá los costos sanitarios por padecimientos entéricos y renales e incrementará los costos productivos agrícolas por la inversión en fertilizantes.

Hipótesis alternativa (H1): El tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital tendrá beneficios parciales en materia ambiental, sanitaria y productiva ya que solo se tratará un porcentaje del volumen anual de agua residual que se descarga en la zona.

OBJETIVOS

General

Evaluar y cuantificar los costos y beneficios ambientales, sanitarios y productivos que tendrá el tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital mediante parámetros de calidad en el agua.

Específicos

O1: Conocer la existencia de peligros o amenazas hacia la salud de la población del Valle del Mezquital como consecuencia del reúso de agua residual sin tratar en la agricultura de riego.

O2: Contrastar las percepciones de los agricultores sobre los costos y beneficios del tratamiento del agua residual con los reales calculados.

ALCANCES

Para esta investigación se consideraron bases de datos de calidad del agua de algunos estudios realizados en el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el estudio realizado por Lesser y Asociados en 2011. Se requirieron los estudios más recientes sobre agua residual sin tratar y acuífero para la elaboración de una base de datos de la cual se pudieran seleccionar parámetros normados en el marco jurídico nacional. Con base en lo anterior, se seleccionaron 23 parámetros de calidad del agua residual sin tratar y agua del acuífero, los cuales se seleccionaron en grupos de materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y sales. Por medio de estos parámetros se elaboraron índices de calidad del agua residual sin tratar, acuífero, agua residual posterior al tratamiento y balance de masas. Los parámetros de materia orgánica y nutrientes y salinidad fueron vinculados con el medio ambiente y la productividad del proyecto de investigación; mientras los parámetros de microorganismos y metales pesados se vincularon con la salud.

Los marcos regulatorios para la elaboración de índices fueron la NOM-001-SEMARNAT-1996, la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2016) (para agua residual), la NOM-127-SSA1-1994 (para el agua del acuífero) y la NOM-004-SEMARNAT-2002 (para suelos). Además, se revisaron los criterios de la OMS, EPA y Comunidad Europea como parámetros de referencia.

En el análisis del desempeño de la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR Atotonilco) se consideren los porcentajes de remoción de los diversos parámetros que debe cumplir la PTAR tanto para los tratamientos biológico y fisicoquímico y están reportados en la literatura.

Para conocer la existencia de posibles amenazas a la salud de la población del Valle del Mezquital se determinaron tasas de morbilidad por enfermedades entéricas y de tasas de mortalidad por insuficiencia renal crónica (IRC) en los 27 municipios. Con base en estas tasas se determinaron los costos en salud en el Valle del Mezquital con y sin la existencia de la PTAR tomando como base datos del Sector Salud y gasto de los hogares en salud. Cabe aclarar que estos datos son una inferencia sobre los posibles costos presentes en salud y a futuro con el tratamiento del agua residual.

Las entrevistas aplicadas a los agricultores fueron un sondeo y no cuentan como una muestra representativa a nivel estadístico. Los resultados de las entrevistas proporcionan un conjunto de percepciones sobre el riesgo, la productividad y el saneamiento en la zona del Valle del Mezquital para conocer los costos y beneficios percibidos que tendría el tratamiento del agua residual. Los costos y beneficios percibidos se contrastan con los datos reales calculados para establecer posibles relaciones o diferencias, aunque estos últimos tienen una mayor representatividad en la investigación por la manera en que fueron determinados.

Las entrevistas aplicadas a los jefes de operaciones de los distritos de riego no se analizaron junto con las entrevistas aplicadas a los agricultores, ya que su finalidad fue complementar el análisis histórico con base en los conocimientos sobre la zona de los tres jefes de operaciones.

Los costos y beneficios monetarios son una proyección basada en estadísticas sanitarias y costos publicadas por la Secretaría de Salud del Estado de Hidalgo, INEGI y la Cámara de Diputados, datos de inversión productiva proporcionados por los agricultores en las entrevistas y estimaciones elaboradas con base en lo anterior. La investigación no determinó todos los costos y beneficios del tratamiento, se determinaron algunos en materia ambiental, sanitaria y productiva.

JUSTIFICACIÓN

En el mundo actual existe una creciente gravedad de un conjunto de problemas que han conducido a hablar de emergencia planetaria, los cuales pueden definirse como *límites planetarios* (Röckstrom, 2009). Se habla de creciente amenaza para el futuro de la humanidad, ya que esta se acerca cada vez más a los límites planetarios e incluso ya haber superado algunos de ellos (Folke, 2013). Asimismo, se presume la existencia de una nueva era geológica, el *Antropoceno*, en la cual se sostiene que la especie humana es la responsable de los profundos cambios que está sufriendo el planeta (Sachs, 2008). A partir de 1998, se hizo un llamado a la comunidad científica para reorientar sus capacidades hacia la resolución de problemas que amenazan crecientemente el futuro de la humanidad (Lubchenco, 1998). Se requiere comprender el carácter fundamental de las interacciones entre la naturaleza y sociedad (Kates, 2001) y atender las necesidades de la sociedad al mismo tiempo que se preservan los sistemas que dan soporte a la vida del planeta (Turner, 2003).

El siglo XXI ha marcado la consolidación de las Ciencias de la Sostenibilidad, cuyo objetivo principal es la resolución de los problemas socioambientales los cuales son complejos y se encuentran interconectados a través de la colaboración de las diferentes disciplinas (Diamond, 2006). Una integración de las diferentes disciplinas científicas, sociales y humanas en el campo académico corresponde a una colaboración interdisciplinaria para la resolución de los problemas que han ocasionado emergencia planetaria. Sin embargo, las Ciencias de la Sostenibilidad buscan incluso integrar los conocimientos de las instituciones gubernamentales y de la participación ciudadana para transitar a la Sostenibilidad y en este sentido que este dominio científico pase de ser interdisciplinario a ser transdisciplinario (Vilches, 2015). Las ciencias de la sostenibilidad exigen planteamientos holísticos que no tengan reduccionismo alguno y los problemas deben visualizarse de acuerdo en la escala que se sitúan, ya sea global, regional o local (Ibídem, 2015).

El presente trabajo se encuentra bajo el dominio de las Ciencias de la Sostenibilidad, ya que analiza la problemática ambiental del reúso y tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital desde una perspectiva holística. Se consideraron los elementos ambientales, sociales (salud) y económicos (productividad) en una escala regional (27 municipios que componen el Valle del Mezquital). Hasta ahora no se han realizado investigaciones interdisciplinarias que analicen los impactos del agua residual sin tratar en el Valle del Mezquital ni de las implicaciones del tratamiento de la misma.

Los diversos trabajos que se han realizado sobre esta zona tienen enfoques disciplinarios desde las ciencias exactas y biológicas, pocos se han abordado desde las ciencias sociales y humanidades. Estas investigaciones han analizado la problemática del reúso y recarga de agua residual en el acuífero con fines sanitarios (exposición a microorganismos presentes en el agua residual sin tratar), edafológicos (cambios en los suelos) e hidrológicos (cambios en el acuífero). Existen también trabajos realizados desde las humanidades, que realizan compilaciones históricas y antropológicas del Valle del Mezquital, al ser el hogar de los hñahñu/otomíes. Por lo anterior, la presente investigación podría servir de referencia para aquellos que realicen futuras investigaciones dentro de la línea de investigación del Valle del Mezquital.

CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES

En esta sección se exponen los antecedentes de la investigación, en primera instancia se habla del Sistema Metropolitano de Drenaje y la descarga del agua residual sin tratar al Valle del Mezquital, el cual es el origen del sistema hídrico-productivo. Posteriormente se presentan las características de la zona del Valle del Mezquital y su transformación a partir del riego con agua residual sin tratar. Se describen las características de los suelos y los acuíferos ya que una de las consecuencias del reúso de agua residual es la recarga del acuífero, así como del Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT). Se explica brevemente la situación del tratamiento de agua en la ZMVM y el megaproyecto de la PTAR Atotonilco. Al ser tratada el agua residual se espera una mejora en su calidad, por lo anterior, se exponen también algunos parámetros que se utilizan para evaluar la calidad del agua para uso rural, urbano y consumo humano. En la figura 1 se puede observar la estructura de los Antecedentes.

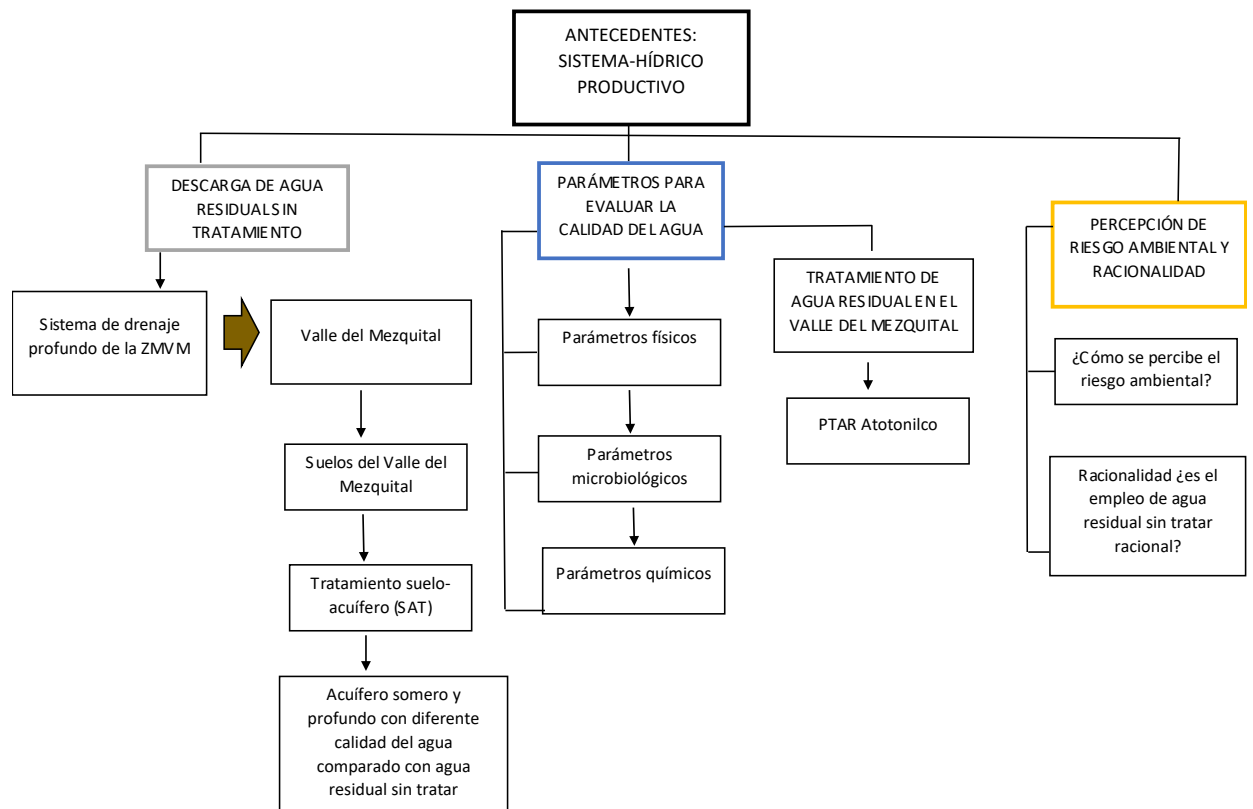


Figura 1. Estructura de los Antecedentes de la investigación

1.1.- El Sistema Metropolitano de Drenaje y la descarga de agua residual sin tratar al Valle del Mezquital.

1.1.1.- El Sistema Metropolitano de Drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

El Valle de México o Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), es el centro económico, financiero, político y cultural de México. Con respecto a su población, es la tercera zona metropolitana más grande de la OCDE y la más grande del mundo fuera de Asia (OCDE, 2015). Está integrada por dos unidades territoriales: Ciudad de México (16 delegaciones), y la zona conurbada (18 municipios del Estado de México) (PAOT, 2002) (Figura 2) (Tabla 1). En el Valle de México el recurso hídrico ha sido considerado como básico para la planeación del desarrollo urbano, desde el abastecimiento de agua potable hasta el drenaje de agua residual producida por 18,215,684 de personas (Eibenschutz, 1999)

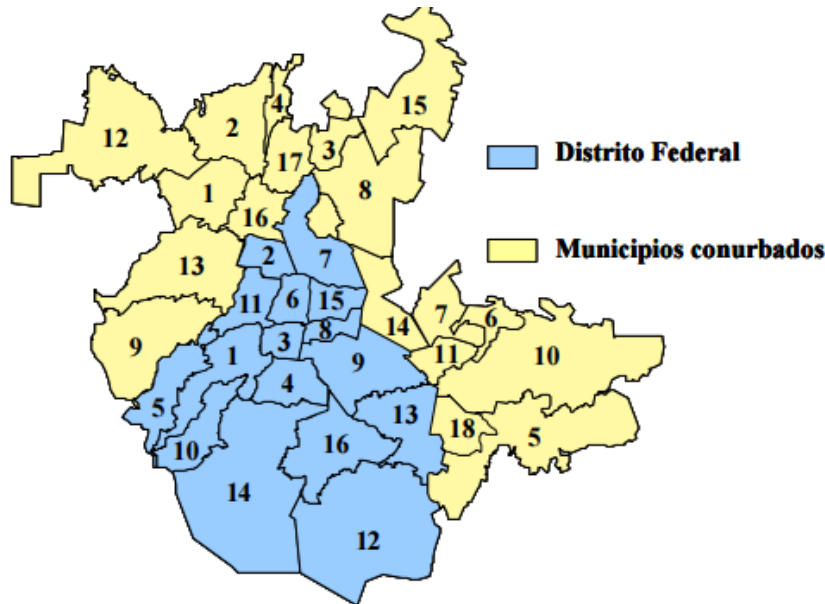


Figura 2. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). PAOT (2002). Modificado de Programa para mejorar la calidad del aire 2002-2010

Tabla 1. Población en las delegaciones de la Ciudad de México y municipios conurbados.

Delegación CDMX	Población	Municipio Edo. Mex	Población
Álvaro Obregón	749982	Atizapán de Zaragoza	11875
Azcapotzalco	400161	Cuautitlán Izcalli	531041
Benito Juárez	417416	Coacalco	284462
Coyoacán	608479	Cuautitlán	149550
Cuajimalpa	199224	Chalco	343701
Cuauhtémoc	532553	Chicoloapan	204107
Gustavo A. Madero	1164477	Chimalhuacán	679811
Iztacalco	390348	Ecatepec	1677678
Iztapalapa	1827868	Huixquilucan	267858
M. Contreras	243886	Ixtapaluca	495563
Miguel Hidalgo	364439	La Paz	293725
Milpa Alta	137927	Nicolás Romero	410118182
Tláhuac	361593	Naucalpan	844219
Tlalpan	677104	Nezahualcóyotl	1039867
V. Carranza	427263	Tecámac	446008
Xochimilco	415933	Tlalnepantla	700734
Total	8,918,653	Tultitlán	520557
		Valle de Chalco	396157
		Total	9,297,031

Fuente: PAOT (2002). Modificado de Programa para mejorar la calidad del aire 2002-2010,

De acuerdo con Eibenschutz (1999), el Valle de México es una zona que año con año “reclama su vocación lacustre”³ particularmente en temporada de lluvias. Por ello, se ha requerido de grandes esfuerzos ingenieriles para drenar agua residual y de lluvia. Seis han sido las grandes obras: el Tajo de Nochistongo (1789); El Gran Canal de Desagüe compuesto por los Túneles de Tequisquiac (1900 y 1954), el Emisor Poniente (1962) el Emisor Central del drenaje profundo (1975) y el Túnel Emisor Oriente (2008). Para el año 2000, la cobertura del drenaje era del 97% en la Ciudad de México y el 92% en el área conurbada. Esto último fue posible gracias a que, en 1995, se invirtieron 5,910 millones de pesos en el Sistema Metropolitano de Drenaje.

El Sistema Metropolitano de Drenaje se subdivide en dos: el *Sistema General de Desagüe* y el *Sistema de Infraestructura Básica*. El primero está conformado por lagos, lagunas, presas de regulación, canales a cielo abierto (112 km) y ríos entubados (54 km). El

³ Se refiere a que la Ciudad de México se edificó sobre lagos y en temporada de lluvias el agua busca depositarse en lo que correspondía al Lago de Texcoco, Chalco, Xochimilco (PAOT, 2002).

segundo se subdivide en el *Sistema de Drenaje Profundo* y el resto de la red principal de drenaje. Esta subdivisión, es el de mayor capacidad, tiene 137.2 km de longitud y está compuesta por el Emisor Central, Gran Canal de Desagüe y el Emisor poniente. Como se ha mencionado anteriormente, la red de drenaje es combinada ya que conduce el agua residual junto con el agua pluvial. En los años noventa, el caudal de desalojo drenaba $57 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales $42.8 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondían al agua de origen urbano y $14.2 \text{ m}^3/\text{s}$ al agua de lluvia (Castañeda en Eibenshutz, 1999) (Figura 3).

Para la misma década, el 70.6% del agua residual desembocaba en el Estado de Hidalgo en los Distritos de Riego Tula (003), Alfajayucán (100) y Ajacuba (112), así como dos distritos del Estado de México Chiconautla (088) y La Concepción (073). El 8.8% se ocupaba en reúso urbano y el 5.9% se ocupa para diferentes usos en el lago de Texcoco (Tabla 2). Actualmente, el Valle del México envía $52 \text{ m}^3/\text{s}$ hacia el Valle del Mezquital (Jiménez C. B. E., 2004). De esta manera se puede observar que el volumen que llega a este último ha disminuido en $5 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual refiere a que la disminución del recurso agua residual no ha sido sustancial en una década.

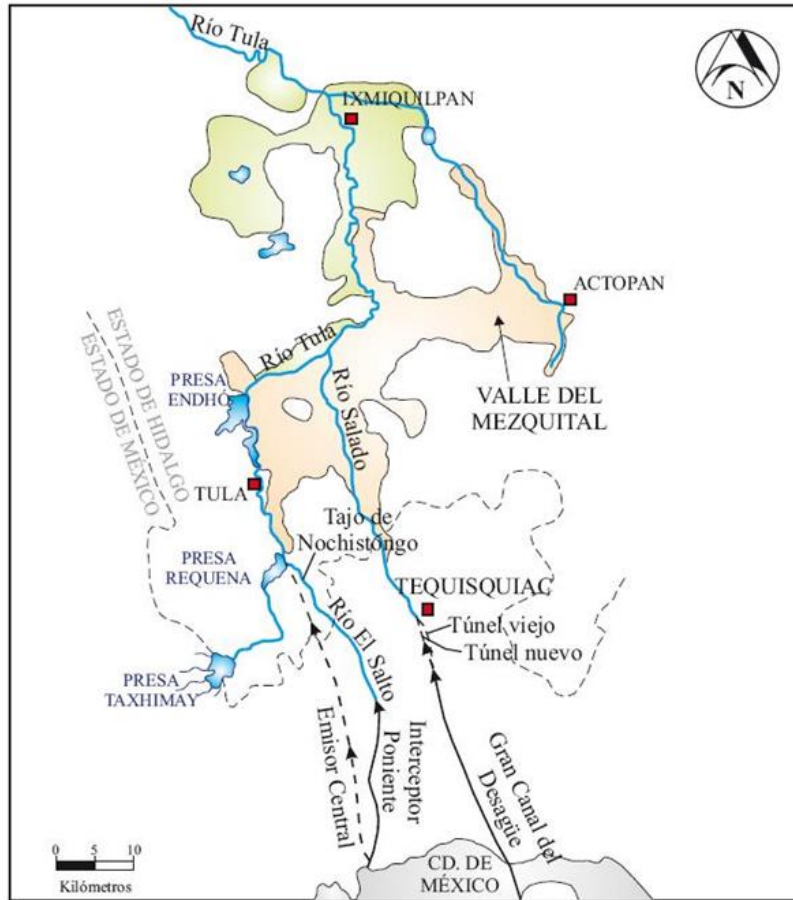


Figura 3. Dren general del Sistema de Drenaje Profundo del Valle de México en el Valle del Mezquital. Fuente: Lesser et al., (2011).

Tabla 2. Distribución del agua residual de la ZMVM (Década de los noventa)

Distribución del agua residual de la ZMVM	
Porcentaje	Usos
8.8	Reúso urbano
5.9	Diversos usos en el Lago de Texcoco
70.6	Directamente a los distritos de riego Tula (003), Chiconautla (088) y La Concepción (073).
14.2	Escurre en presa Endhó para ser utilizada en riego (90,000 ha)

Elaboración propia con base en Castañeda, 1999. Bases para la Planeación del Desarrollo Urbano en la Ciudad de México.

De acuerdo con la tabla anterior, Hidalgo es el estado que recibe la mayor cantidad de agua residual de la ZMVM. En 1998, el British Geological Survey realizó un informe sobre el reúso de agua residual en el Valle del Mezquital. Este informe reporta que cerca del

70% del agua del drenaje se distribuye en cinco distritos de riego, los cuales ya han sido mencionados. Esta agua sin tratamiento ha sido desde entonces la fuente principal de agua para uso agrícola, ya que este valle se encuentra limitado en cuanto a disponibilidad natural de la misma. A nivel mundial el Valle del Mezquital tiene un esquema de agricultura de riego que ocupa agua residual urbana (BGS, CNA, & LSHTM, 1998).

1.1.2.- Características del Valle del Mezquital y transformación de la zona a partir del riego con agua residual sin tratar

Geográficamente, El Valle del Mezquital (Figura 4) se encuentra ubicado en el centro-oeste del estado de Hidalgo, y se considera como parte del altiplano central mexicano y como una prolongación de la Cuenca de México (Assad y Sarmiento, 1991). El clima en el Valle del Mezquital es semiseco en el centro y subhúmedo en las partes altas, con lluvias en verano (Lesser, 2013). Dentro de la vegetación actualmente predominan arbustos espinosos, como el nopal, garambullo, biznaga y maguey (Figura 5). Hidrográficamente, el Valle está situado principalmente en la cuenca del Río Tula (vertiente principal), Río Moctezuma (corriente marginal), Río Actopan, Río Alfajayucán (Fabre, 2004), Río el Salto y también se encuentran embalses artificiales como las presas Javier Rojo Gómez, Vicente Aguirre y Endhó (BGS, CNA, & LSHTM, 1998).

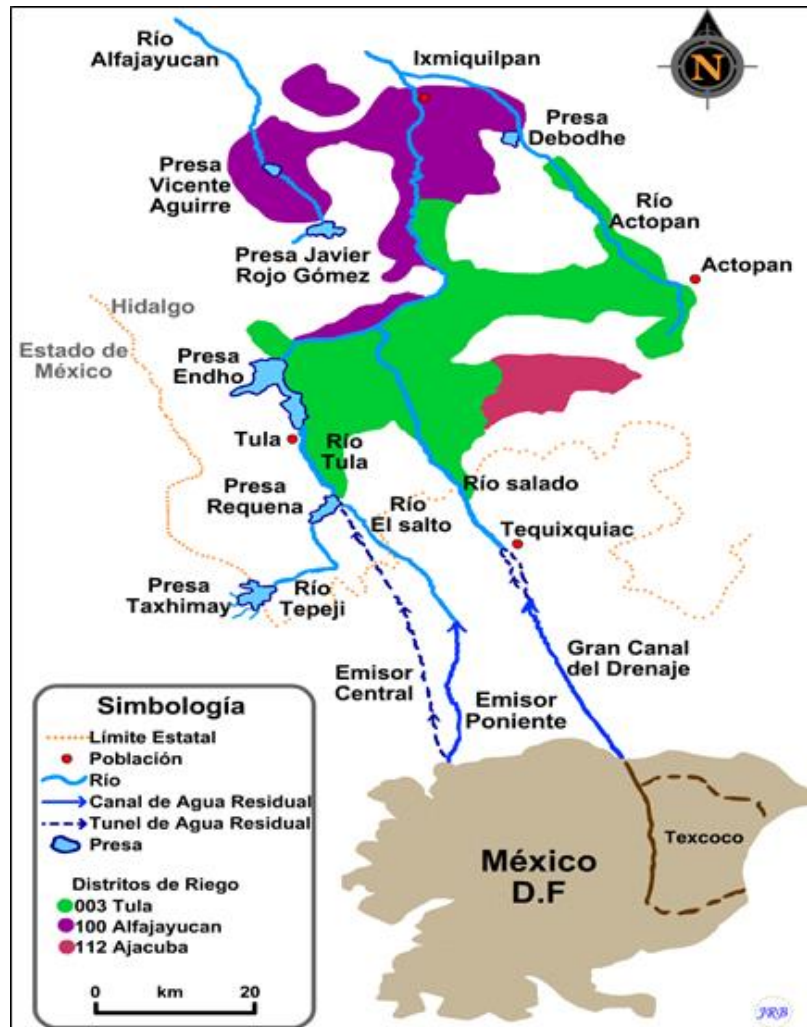


Figura 4. Transporte del agua residual generada en el valle de México y envío al Valle de Tula en los distritos de riego (Fuente: Grupo Tratamiento y Reúso del Agua).

El Valle del Mezquital es una región semiárida con un clima semiseco, lo cual lo hace poco propicia para agricultura, en esta zona denomina el ecosistema de matorral xerófilo (Figura 4). Es también la región económica más grande de Hidalgo y está conformada por 27 municipios: Actopan, Alfajayucán, Ajacuba, El Arenal, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Cardonal, Chapatongo, Chilcuautla, Francisco I. Madero, Huichapan, Ixmiquilpan, Mixquiahuala, Nopala, Progreso, San Agustín Tlaxiaca, San Salvador, Santiago de Anaya, Tasquillo, Tecozautla, Tepeji del Río, Tepetitlán, Tetepango, Tezontepec de Aldama, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan, y Tula de Allende. El Valle del Mezquital es la región con el mayor desarrollo económico impulsado por la agricultura de riego y las industrias (CEPIS,

Sistemas integrados de tratamiento uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial., 2002).



Figura 5. Ecosistema de matorral xerófilo en el municipio de Tetepango, Hgo.

De acuerdo con el British Geological Survey (1998), el riego con agua residual en el Valle del Mezquital tuvo sus inicios en los municipios de Tlaxcoapan y Tlahuelilpan alrededor del año 1896. Durante esta época el agua era depositada en el Rio Salado, para 1920 el riego con agua residual ya tenía una gran relevancia y se requirió de la construcción de infraestructura para facilitarlos. El distrito Tula (003) comenzó a constituirse en 1906, para el manejo del agua excedente, fue necesario la construcción de presas entre las que se incluye la Requena construida en 1920, la presa Taxhimay y la presa Endhó en 1934. Para 1938, la zona Tula-Mixquiahuala era la más irrigada y en 1964 la riego comenzó a ser combinada (agua residual y agua subterránea), el área irrigada comenzó a expandirse hacia el este del Valle (BGS, CNA, & LSHTM, 1998).

Posterior a 1964 se impulsó un proyecto de construcción canales de riego de alto nivel que se fueron expandiendo hacia el sur del Valle. Los usos del agua residual en la zona este del municipio de Ajacuba comenzaron durante este proyecto y se propuso un área de riego para Actopan. El exceso de drenaje agrícola fue enviado a los ríos Actopan y Tula, estos comenzaron a llegar junto con el agua residual no utilizada al Distrito de Riego Alfajayucán

(100). En 1975 con la construcción del Emisor Central se reemplazó la descarga hacia el Río Salado y el aprovechamiento del agua residual generó una gran demanda de este recurso (Ibidem, 1998)

La cobertura de los canales de riego se llevó a cabo a finales de los años ochenta y principios de los noventa. Una cantidad de agua residual es distribuida directamente de este punto a través del canal El Salto-Tlamaco hacia el sur del Valle y por medio del canal Requena hacia el Río Tula y abastece a los distritos de riego 003 y 100. El resto del agua pasa a la Presa Endhó, en donde se almacena y se distribuye por el canal Endhó y complementa el abastecimiento de los distritos de riego 003 y 100 (sobre todo durante la época de secas). Una cantidad adicional de agua residual se distribuye a través de los túneles de Tequisquiac, actualmente el Gran Canal de Desagüe en hacia el Río Salado que abastece al DR112.

La agricultura es una de las actividades económicas principales en esta zona y es también una tradición (Boege, 1974) y el riego ha modificado el patrón de asentamiento disperso que prevalecía en los valles y ahora se observa la formación de poblados con predios alineados a lo largo de los canales de riego (Fabre P., 2004). En los años sesenta con la *Revolución Verde* la tecnología llegó al Valle del Mezquital a través de semillas mejoradas, fertilizantes, créditos semillas mejoradas, y asesoría técnica. Lo anterior ocasionó que los agricultores diversificaran los cultivos y se comenzaron a producir hortalizas y forrajes, ya que eran más rentables y productivos (Ibidem, 2004), y en la actualidad continúan siendo los más producidos (Chávez, M. & Jiménez Cisneros, 2016).

Con el paso de los años el Valle del Mezquital fue tomando gran importancia agrícola por ser una región abastecedora de alimentos para las ciudades cercanas, como la Ciudad de México y Pachuca (Peña, 2011). Actualmente, la expansión de propiedad de la tierra y la introducción del riego en forma extensiva conforman una transformación regional que modifica la situación económica, social, y ambiental del Valle del Mezquital (Fabre, 2004). Esto se puede comprobar con la demanda de agua que se requiere para agricultura en esta zona, la cual es del 76% y esta proviene de la subcuenca del Río Tula (Gobierno del Estado de Hidalgo, 2011). La distribución del sistema de agua residual está completamente controlada y manejada por las autoridades de los Distritos de Riego (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016).

1.2.- Edafología e hidrogeología del Valle del Mezquital y su relación con el tratamiento suelo-acuífero (SAT).

1.2.1.- Clasificación de los suelos del Valle del Mezquital.

Los suelos del Valle del Mezquital tienen un pH alcalino entre 7 y 8 unidades de pH y tienen cantidades considerables de calcio, por lo cual se consideran suelos neutros. Los suelos del Valle del Mezquital requieren de la materia orgánica que el agua residual sin tratar provee, pero se requiere limitar la aplicación de constituyentes como huevos de helminto y metales pesados (Jiménez Cisneros & Chávez M., 2011). Los suelos que se encuentran presentes en esta zona son leptosols, vertisols y feozem (Siebe G. C. , 1994).

Los leptosoles son suelos poco profundos y, por ende, poco productivos. Son suelos muy superficiales, con poco espesor que se forman sobre rocas duras o muy pedregosas, son suelos muy poco aptos para la agricultura (INEGI, Guía para la Interpretación de Cartografía y Edafología, 2017) (Tabla 3). Los feozem son suelos de profundidad media que son ricos en materia orgánica y esto ocasiona que tengan una productividad media-alta. Son suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en zonas muy húmedas o demasiado desérticas, tienen una capa superficial oscura y rica en materia orgánica y nutrientes (Ibidem, 2017). (Instituto Geográfico Nacional de España, 2017) (Tabla 3).

Tabla 3. Tipos de suelos estudiados en el Valle del Mezquital

Suelo	Textura	% de materia orgánica	Observación
Leptosol	Franco-arenosa a franco-arcillosa	3.1 a 6.4	Poco profundos (< 30cm) Usado agrícolas
Feozem	Franco-arenosa a franco-arcillosa	1.6 a 4.5	Suelos profundos (60 – 70 cm) Alta productividad
Vertisol	Arcilla limosa a arcilla	3.8 a 5.5	Suelos profundos Uso principalmente agrícola.

Fuente: Murillo T. Rosa María (2012). En Movilidad de di (2-etilhexil) ftalato y nonilfenoles en tres clases de suelo del valle de tula”.

1.2.2.- Tratamiento suelo-acuífero (SAT por sus siglas en inglés)

El Tratamiento suelo acuífero (SAT) (Figura 6) es una serie de procesos que se llevan a cabo gracias a la descarga de agua residual sin tratar en un terreno y funciona como una técnica de depuración natural. Este método se ha utilizado con la finalidad de eliminar efluentes por medio de un sistema barato y sin complejidad técnica, aunque también fue utilizado para riego. Posteriormente, esta técnica se comenzó a aplicar como un sistema alternativo de depuración y como un mecanismo muy eficaz de regulación de recursos hídricos en zonas donde estos escasean de manera importante. En la actualidad, esta técnica tiene objetivos precisos como depurar el agua residual, recargar el acuífero subyacente, reutilizar el agua en agricultura, evitar la intrusión salina, mejorar los acuíferos altamente deteriorados e incrementar el caudal de ríos o manantiales relacionados con el acuífero recargado (Acosta H., 2010).

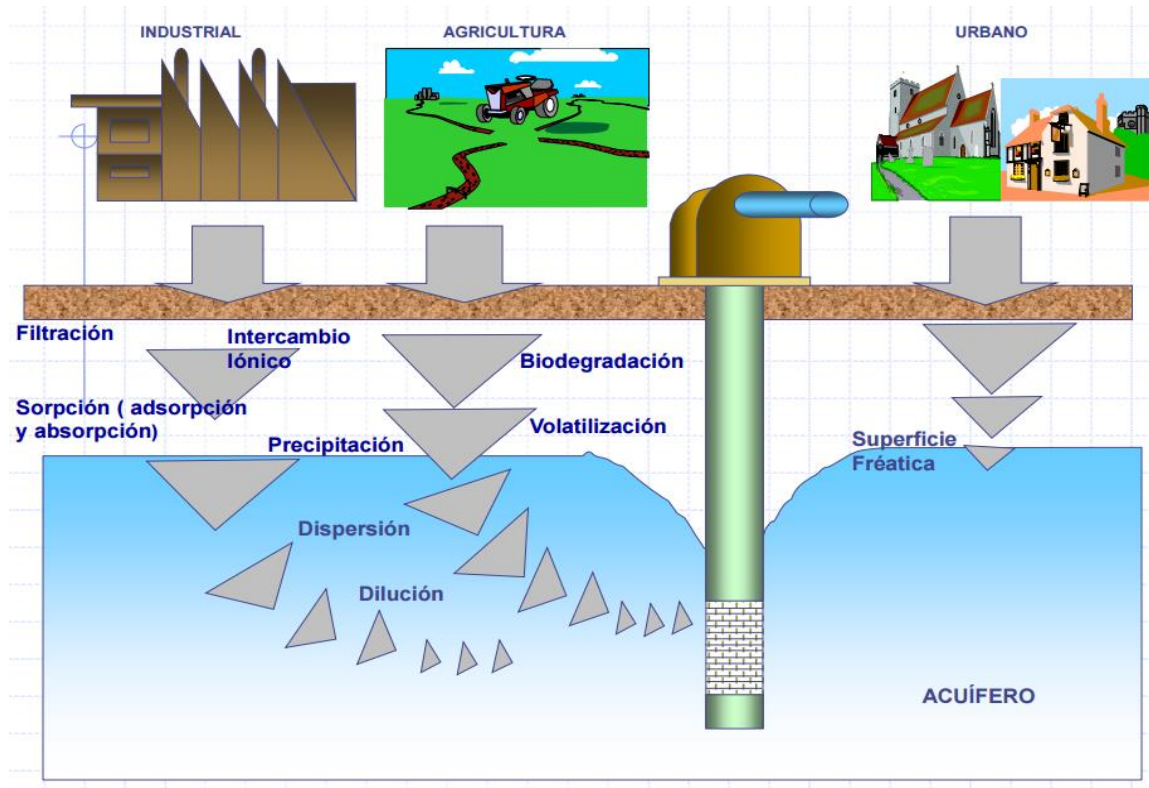


Figura 6. Proceso del “Tratamiento suelo-acuífero” (SAT). Fuente: IINGEN, UNAM (2014). Soluciones a la contaminación de suelos y acuíferos.

En el Valle del Mezquital, el Tratamiento suelo-acuífero (SAT) se ha llevado a cabo de manera incidental por un periodo cercano a 97 años. Este proceso ha sido muy importante en esta región porque no solo ha impulsado la agricultura, sino también ha eliminado sustancias contaminantes presentes en el agua (Ibidem, 2010).

Los procesos principales para depurar el agua una vez infiltrada en el suelo son: filtración, intercambio iónico, adsorción, reacciones químicas, precipitación, mezcla y dilución, cambio de pH, hidrólisis, volatilización, asimilación biológica, reacciones microbiológicas y desintegración radiactiva (Figura 6), a continuación, se describen de manera resumida (Ibidem, 2010).

Filtración: Se separan los líquidos de los sólidos, en este caso los sólidos de mayor tamaño se quedan en el suelo y el agua pasa a través de este.

Adsorción: Los sólidos disueltos y gases son retenidos por el suelo.

Absorción: Los sólidos disueltos y gases se separan y con ayuda del agua pasan a una fase líquida.

Intercambio iónico: Se da un intercambio de cationes y aniones entre el suelo y el acuífero, lo cual provoca una purificación y separación de los iones que contiene el agua, realizando una depuración.

Precipitación: Se da cuando de una solución gaseosa se satura de vapor de agua, esta se condensa se condensa y se desprende en forma líquida.

Dispersión: Es una mezcla sub-superficial debida al movimiento del agua subterránea y a las heterogeneidades del acuífero y puede ocurrir en las direcciones longitudinal, transversal y vertical (González H., 2007).

Dilución: Puede ser un proceso de atenuación importante bajo varias circunstancias diferentes, los contaminantes se pueden mover muy lentamente con el agua subterránea y fluye hacia una zona donde la recarga superficial entra a la unidad del acuífero (Ibidem, 2007).

Biodegradación en el suelo: En el sistema de tratamiento suelo-acuífero se da una remoción de concentraciones de sustancias orgánicas principalmente por degradación biológica. La biodegradación implica la degradación de compuestos orgánicos a través de organismos microbianos (Singh & Ward, 2004).

Volatilización: En este proceso los contaminantes sólidos pasan a un estado gaseoso sin necesidad de pasar por el estado líquido, ya que hay una temperatura elevada entre el suelo y el acuífero.

1.2.3.- Clasificación de los acuíferos del Valle del Mezquital

Existen dos tipos de acuífero en el Valle del Mezquital, el primero es de tipo libre, somero, es decir un acuífero superficial y está representado por manantiales y algunos pozos, con valores de profundidad del nivel estático de alrededor de 10 metros. El segundo acuífero se localiza en los basaltos es un acuífero profundo siendo el principal del Valle del Mezquital que en muchos sitios el nivel de este acuífero se encuentra mezclado con agua residual sin tratar y presenta un nivel estático 40 metros más profundo (Lesser C., 2011).

El acuífero del Valle del Mezquital tiene seis subacuíferos principales: Mezquital, Actopan, Ixmiquilpan, Ajacuba, Chapantongo-Alfajayucán y Tepeji del Río (Tabla 4). El acuífero Mezquital tiene una profundidad entre 10-40 m, por lo cual puede considerarse somero al igual que el acuífero de Tepeji del Río. Los acuíferos de Actopan, Ixmiquilpan, Ajacuba y Chapantongo-Alfajayucán son acuíferos profundos que llegan hasta los 100 y 200 metros. Los subacuíferos infiltran agua residual de los canales de distribución que se encuentran en el Valle del Mezquital, ya que el 50% de estos no se encuentran revestidos (Chávez, M. & Jiménez Cisneros, 2016). Dentro de los seis subacuíferos hay una infiltración de agua de 23 m³/s mayor a la infiltración del agua de lluvia, lo cual se puede relacionar con la cantidad de agua que el Valle del Mezquital recibe en general (50-52 m³/s) de los cuales 78% corresponden a agua residual y el 12% restante es agua de lluvia (Lesser C., 2011).

Tabla 4. Principales subacuíferos del Valle del Mezquital, balance hídrico y profundidad

Principales subacuíferos del Valle del Mezquital				
Subacuífero	Infiltración de aguas subterráneas	Salida de aguas subterráneas	Infiltración de aguas de lluvia	Profundidad
Mezquital	165.2 Mm ³ /año	97.7 Mm ³ /año	15.8 Mm ³ /año	10-40 m
Actopan	77.1 Mm ³ /año	47.3 Mm ³ /año	11.7 Mm ³ /año	60-100 m
Ixmiquilpan	78.0 Mm ³ /año	18.2 Mm ³ /año	4.6 Mm ³ /año	<20-100 m
Ajacuba	9.14 Mm ³ /año	4.14 Mm ³ /año	ND	100-180 m
Chapantongo-Alfajayucan	53.1 Mm ³ /año	5.5 Mm ³ /año	ND	50-200 m
Tepeji del Río	18.8 Mm ³ /año	7.2 Mm ³ /año	ND	10-40 m

Fuente: Elaboración propia con base en Lesser et al., (2011).

1.3.- Parámetros de calidad del agua normados para uso rural, urbano y consumo humano y problemas relacionados con la pérdida de la calidad de la misma.

El agua tiene diferentes usos en las actividades económicas, así como para el consumo humano y de acuerdo con esto debe cubrir con cierto estándar de calidad de acuerdo con la normatividad vigente. A continuación, se describen las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, para determinar si es adecuada para el uso que se le pretende dar.

1.3.1.- Parámetros físicos

Lo primero que se debe evaluar son las características físicas que de acuerdo con (Tchobanoglous, 1985) son las siguientes:

- a) *Sólidos*, según su tamaño y estado se clasifican en sedimentables, suspendidos, coloidales o disueltos.
- b) *Turbidez o turbiedad*, es el grado de claridad del agua que se verifica por la penetración de luz a través del líquido.
- c) *Olor*, indica la presencia de materia orgánica en descomposición o presencia de minerales atribuida a la reducción de sulfatos por actividad microbiana.
- d) *Temperatura*, altera un gran número de características del agua, ya que su aumento influye en la tasa de las reacciones químicas y bioquímicas.
- e) *Color*, revela material coloidal en suspensión.

1.3.2.- Parámetros químicos

- a) *Iones mayores en agua*, calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K), bicarbonato (HCO_3), cloruros (Cl) y nitratos (NO_3)
- b) *Iones menores en agua*, aluminio (Al), amonio (NH_4), arsénico (As), bario (Ba), borato (BO_4), cobre (Cu), hierro (Fe) y manganeso (Mn).
- c) *Especies inorgánicas, principalmente metales pesados*, cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), selenio (Se), plata (Ag), zinc (Zn).
- d) *Nitrógeno y fósforo*, son especies inorgánicas aportadas a los sistemas terrestres por las actividades humanas. Se identifican en fertilizantes para las plantas y se vierten con aguas residuales o de retorno agrícola a cuerpos de agua. Algunos de estos compuestos son amonio (NH_4), nitritos (NO_2), nitratos (NO_3), fósforo (P).
- e) *pH*. La concentración del ión hidrógeno brinda las condiciones de neutralidad, acidez o alcalinidad del agua. Es relevante porque determina las reacciones químicas.
- f) *Alcalinidad*. Capacidad del agua de neutralizar ácidos.
- g) *Conductividad*. Es un parámetro que permite caracterizar la habilidad de una solución para conducir una corriente eléctrica.
- h) *Dureza*. Representa la suma de las concentraciones de calcio y magnesio.

Además, se debe incluir los compuestos orgánicos naturales como las proteínas, carbohidratos y lípidos, las medidas de materia orgánica y su descomposición son la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y el Carbono Orgánico Total (COT).

1.3.3.- Parámetros microbiológicos

Las características biológicas del agua se relacionan con las poblaciones de microorganismos presentes en el agua que afectan directamente su calidad del agua al transmitir enfermedades (Ibidem, 1985). Este tipo de microorganismos están asociados materia fecal de animales y humanos que se desecha de manera inadecuada en los cuerpos de agua superficiales o de agua subterránea (Ffolliot, Bojórquez Tapia, & Hernández Narváez, 2001) o en agua residual que se descarga desde un centro de población. Los

microorganismos encontrados en agua dulce contaminada y residual son virus, bacterias, algas, protozoarios, helmintos, rotíferos y crustáceos (Tchobanoglous, 1985).

1.3.4.- Problemas relacionados con la pérdida de la calidad del agua

Los problemas más frecuentes en el agua para uso y consumo humano, ya sea agua superficial o subterránea, están relacionados con parámetros microbiológicos, especialmente con los huevos de helminto y los coliformes fecales (Jiménez C. & Chávez M., 1998). En el agua empleada para riego, los huevos de helminto y los coliformes fecales son el problema sanitario más relevante en México (Ibídem, 1998). Los huevos de helminto y los coliformes fecales pueden ser patógenos para humanos, afectando a grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con deficiencias inmunitarias (OMS, 2008). Algunos factores de riesgo para estos grupos vulnerables son la edad, el sexo, el estado de salud y las condiciones de vida (Ibidem, 2004).

A) Contaminación microbiológica

Los patógenos pueden ser adquiridos por medio del agua debido a tres motivos: 1) origen hídrico, 2) carencia de agua o higiene inadecuada y 3) contacto directo con el agua contaminada. Los patógenos de origen hídrico se encuentran en la materia fecal y son transmitidos por ingestión de agua contaminada. Los organismos adquiridos por falta de agua o higiene deficiente proceden de materia fecal y se transmiten por la ingesta de alimentos que se consumen crudos y no son lavados y desinfectados como las legumbres y hortalizas (OMS, 2008).

Un tipo de microorganismos comunes que contaminan el agua son las enterobacterias, los cuales son encontrados frecuentemente en el agua residual (Jiménez C. B. E., 2004). Este tipo de bacterias provocan infecciones intestinales y diarreas bacterianas; algunas de ellas son *Escherichia coli*, *Salmonella* y *Shigella*. También los coliformes fecales y totales se utilizan como parámetros de la calidad del agua (OMS, 2008). El contagio de este grupo de bacterias es a través del agua y los alimentos contaminados con materia fecal que no son lavados o desinfectados. Los niños menores de cinco años, los ancianos y las personas inmunocomprometidas son los grupos más vulnerables de la población (OMS, 2008). A continuación, se describen las enterobacterias antes mencionadas.

A₁) *Escherichia coli*, Existen al menos seis categorías de esta bacteria que causan diarrea, infecciones del tracto genitourinario y una infección de meningitis. También existen cepas de vida libre como la que coloniza el colon de los recién nacidos y forma parte de la flora intestinal de los animales de sangre caliente. La *E. coli* puede ocasionar hemorragias intestinales, falla renal e incluso la muerte. Los brotes se han relacionado con el consumo de hamburguesas mal cocidas, agua contaminada y agua de uso recreativo (Kaper, 2004).

A₂) *Salmonella*, el género tiene cerca de 200 especie, denominadas tifoidales y no tifoidales de acuerdo con el tipo de enfermedades que ocasionan. Su distribución es a nivel mundial y sobrevive en ambientes diversos, incluso a la congelación por meses. Puede producir enfermedades asintomáticas, tifoidea y paratifoidea por *Salmonella typhi* y *Salmonella paratyphi*, respectivamente.

A₃) *Shigella*, el género tiene cuatro especies y todas son nocivas para el ser humano. Las cepas patógenas producen shigellosis, cuyos síntomas clínicos incluyen diarrea, fiebre, disentería y pueden ocasionar la muerte si no son tratados (Theron & Cloete, 2002).

Otros microorganismos que contaminan el agua son los protozoarios, los cuales pueden ser amebas o simplemente formar parte del reino protista. Algunos de los más comunes son la *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*, los cuales se describen a continuación:

A₄) *Entamoeba histolytica*, puede ser una infección asintomática al principio, pero también puede desencadenar ulceraciones en el tracto gastrointestinal denominadas disentería amebiana. Se transmite de persona a persona o por la ingesta de agua o alimentos contaminados donde se encuentran los quistes (Madigan & Parker, 2000).

A₅) *Giardia lamblia*, es un protozoo flagelado que se transmite a los humanos a través de agua contaminada con heces fecales, aunque también se transmite por medio de los alimentos y contacto sexual. Produce una enfermedad llamada giardiasis, la cual es una gastroenteritis aguda. Al encontrarse en un nuevo huésped, los quistes germinan y se unen a las paredes del intestino, ocasionando síntomas como diarrea repentina, líquida y maloliente.

Los helmintos son otro tipo de microorganismos parasitarios que se pueden encontrar en el agua en forma de huevo. Los huevos de helminto son organismos microscópicos que no pueden observarse a simple vista. Se pueden encontrar en el suelo, agua dulce y salada. Los huevos son la forma en que parasitan al ser humano y al ser este organismo su huésped

facilita su ciclo de vida. Aunque los cuerpos de agua son sitios donde los helmintos desarrollan su ciclo de vida, la cantidad de ellos se asocia más a los aportes de huevos que el ser humano efectúa mediante la descarga de agua residual.

Uno de los helmintos más comunes es *Ascaris lumbricoides*, el cual al encontrarse en una cantidad considerable en el agua puede provocar problemas intestinales u obstrucción intestinal. Los huevos de *Ascaris lumbricoides* al igual que los de otros helmintos son estructuras de resistencia del parásito que les permite pasar de un hospedero a otro (humano a humano) y ser viables, por lo que los huevos son resistentes a la desinfección por medio de cloro, ozono y luz ultravioleta, y por estas razones se deben eliminar a través de otros tratamientos como la sedimentación, coagulación-floculación y filtración (Mazari H. M., 2001).

B) Contaminación química

Este tipo de contaminación se da principalmente por metales pesados, los cuales se denominan así porque tienen una densidad mayor a 5 g/cm^3 y algunos ejemplos de estos son el cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn). Este tipo de metales pueden tener efectos en el sistema nervioso central, renal, además de provocar alergias, intoxicación y se asocian también con el padecimiento al cáncer (OMS, 2008).

El riñón es el órgano más afectado en las personas expuestas a los efectos del cadmio. Las enfermedades crónicas obstructivas de las vías respiratorias están asociadas a la exposición prolongada e intensa por inhalación. Se tienen pruebas de que la exposición al cadmio puede contribuir al desarrollo de cáncer de pulmón (OMS, 2008). El cadmio presente en los alimentos es la principal fuente de exposición para la mayoría de las personas. Con una ingesta acumulativa de 2000 mg o más de cadmio se produce en el ser humano una asociación entre la exposición al cadmio y una mayor excreción de proteínas de bajo peso molecular en la orina (OMS, 2008). Lo anterior son síntomas de enfermedad renal.

El cromo (III) es un nutriente esencial y es relativamente no tóxico para el hombre. El cromo (VI) es un peligro para la salud humana, mayoritariamente para la gente que trabaja en la industria siderúrgica y textil. El cromo (VI) es conocido por causar varios efectos sobre la salud, al ser un compuesto en los productos de la piel puede causar reacciones alérgicas y

erupciones cutáneas. El cromo hexavalente puede causar también daño en los riñones e hígado, alteración de material genético y cáncer de pulmón (Ibídem, 1988).

En México los parámetros mayormente empleados para evaluar la calidad del agua son: alcalinidad, cloruros, coliformes fecales, color, conductividad, surfactantes, dureza, pH, sólidos suspendidos totales, fosfatos, grasas y aceites, nitratos, oxígeno, sólidos totales disueltos y turbidez (CONAGUA, Normas oficiales, 2016). En 2001 se modificó el criterio de evaluación, de manera que se agregaron dos parámetros, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Estos parámetros permiten conocer las condiciones del agua que van desde una condición natural o sin influencia de actividad humana, hasta indicios o aportaciones importantes de aguas residuales de tipo doméstico, industrial o una mezcla de ambas (CEPIS, Sistemas integrados de tratamiento uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial., 2002). . Esta información también es útil para la toma de decisiones en cuanto a la elección de un sistema de tratamiento adecuado.

1.4.- El tratamiento de agua residual en la ZMVM y el megaproyecto de la PTAR Atotonilco en el Valle del Mezquital

El tratamiento del agua residual en México es uno de los asuntos más rezagados en materia hídrica a nivel nacional, incluso siendo existente un marco jurídico integral⁴. A partir del año 2000 se puso especial énfasis en avanzar en este aspecto, lo cual quedó expuesto en los objetivos planteados en el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2000-2006 y 2007-2012. El saneamiento⁵ es una condición que no debe dejarse de lado para lograr la sustentabilidad hídrica⁶, por lo cual se debe incrementar el tratamiento de las aguas residuales e incentivar el reúso de estas a través de la rehabilitación y construcción de nueva infraestructura hidráulica

⁴ Existen las Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y la NOM-004-SEMARNAT-2001 relativas a los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, aguas residuales tratadas, lodos y biosólidos.

⁵ Se entiende como la conducción, tratamiento, alejamiento y la descarga de las aguas residuales, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (LAN).

⁶ En este apartado se ocupa el concepto de sustentabilidad, ya que este se encuentra referido en la literatura consultada para la elaboración de este capítulo y se entiende de la misma manera que sostenibilidad. Aunque a nivel internacional y bajo las distintas conferencias sobre el desarrollo sostenible se observa una clara diferencia entre ambos conceptos, siendo mayor referido este último (Informe de Burdland, 1987).

(CONAGUA, Memoria Documental de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco., 2012).

En 2008 el Comité Técnico del Fideicomiso 1928, integrado por la CONAGUA, la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), el Gobierno del Distrito Federal y el Gobierno del Estado de Hidalgo se dieron cita con el presidente de la república para discutir un megaproyecto para tratar el agua residual en el Valle del Mezquital. El presidente en turno, Felipe Calderón, anunció la PTAR “El Salto” hoy la PTAR Atotonilco (Figura 7), un megaproyecto para el saneamiento integral del Valle del Mezquital (y de toda la ZMVM). La selección de la ubicación en el municipio de Atotonilco se debe a que este municipio pertenece al Valle del Mezquital ⁷. La instalación de la planta tiene relación con la localización del Emisor Central y del Túnel Emisor Oriente (TEO)⁸, en etapa de arranque, los cuales serán los principales influentes para la PTAR Atotonilco (Peña G., 2011).

⁷ En este municipio inicia la descarga de agua residual y es el punto en donde dan inicio los distritos de riego que existen en esta región, también existen aquí calizas y arcillas propicias para la disposición de los lodos que la planta generará.

⁸ El TEO tendrá una longitud de 60 km y una capacidad de desalojo de 120 m³/s, y el cual tendrá un costo de 10 mil millones de pesos. Este sistema funcionará a la par con el Emisor Central en temporada de lluvias y de manera alternada en temporada de secas y ambos desalojarán el agua residual en la cuenca del Río Tula (CONAGUA, 2012).



Figura 7. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTAR). Fuente: ULMA (2011).

1.4.1.- La PTAR Atotonilco como proyecto de saneamiento integral del Valle del Mezquital

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTAR) será una de las seis plantas de tratamiento que el gobierno tiene contempladas para tratar el 100% del agua residual del Valle de México a través del Programa denominado *Sustentabilidad Hídrica del Valle de México*. La inversión inicial contemplada fue de 400 millones de pesos, aunque el costo total estimado es de 10 mil millones de pesos. La concurrencia para la construcción de la PTAR sería capital público, capital privado y pago por servicios ambientales. La capacidad que la PTAR será de 23 m³/s en temporada de estiaje, sumando 12 m³/s durante la época de lluvia, lo cual la ubica como una de las plantas de tratamiento más grandes del mundo. Se argumentó que esta planta al tratar el agua eliminará los contaminantes propios del agua residual, pero aportará nutrientes esenciales para la agricultura⁹ y también podrá ser utilizada

⁹ Se argumenta que el tratamiento del agua residual potenciará la agricultura proveyendo cultivos más rentables en más de 125 mil hectáreas.

en la industria (CONAGUA, Memoria Documental de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco., 2012).

Los aspectos técnicos de la PTAR directamente con su capacidad y eficiencia de remoción de parámetros en las épocas de estiaje y lluvias. La PTAR Atotonilco consta de dos tipos de procesos: tren de tratamiento biológico, también llamado Tren de Proceso Convencional (TPC), y un Tren de Proceso Químico (TPQ) (Ibidem, 2012). Cada uno de estos trenes de tratamiento tendrá una capacidad específica de tratamiento (Tabla 5). El TPC será el de mayor capacidad en época de lluvias al tratar 27.6 m³/s y 23 m³/s en época de secas. Por otro lado, el TPQ sólo operará durante le época de lluvia y tendrá una capacidad de 12 m³/s. El sistema total ocupa una superficie de 158,512 hectáreas, tendrá una capacidad total de tratamiento es de 35 m³/s.

Tabla 5. Aspectos técnicos de la PTAR Atotonilco

Superficie	Capacidad Total	Capacidad TPC	Capacidad TPQ
		Lluvias y estiaje	Lluvias
158.5 ha	35 m ³ /s	27.6 y 23 m ³ /s	12 m ³ /s

Elaboración propia con base en: CONAGUA (2012).

Etapas de tratamiento del agua residual contenidos en la PTAR Atotonilco

De acuerdo con la Memoria documental de la PTAR, CONAGUA (2012) y la Figura 8, el proceso de tratamiento biológico del agua residual consta en las siguientes operaciones unitarias:

A) Pretratamiento. Consta de rejillas de desbaste, rejillas automáticas, rejillas finas automáticas. En esta primera parte del tratamiento llevarán a cabo una separación del agua de sólidos mayores, tierra, grasas y aceites. El agua residual llegará por gravedad al *desarenador-desengrasador* y se eliminarán grasas, arenas y aceites.

B) Sedimentación primaria. El agua residual será conducida por el canal de agua desarenada para ser dividida entre los trenes de tratamiento convencional y el tren de tratamiento químico. Los clarificadores primarios son parte del TPC y otra parte del agua es

enviada al TPQ. El caudal máximo de operación que será alimentado hacia el TPC será de 33 m³/s y 17 m³/s para el TPQ que operará sólo en época de lluvia. El efluente clarificado proveniente de los sedimentadores primarios será colectado en el cárcamo de bombeo para ser bombeado a las cajas de distribución de los reactores correspondientes.

C) Tren de Proceso Convencional (TPC): Tiene un proceso de lodos activados, el cual tiene la función de degradar biológicamente la materia orgánica que contiene el agua residual. El sistema la componen un proceso de lodos activados, una sedimentación secundaria, la desinfección a base de cloro y obra de descarga. En estiaje, el agua residual tratada por medio del TPC se pondrá a disposición para riego agrícola.

C₁) Sedimentación secundaria.

El sistema de tratamiento secundario está conformado por 24 módulos, compuestos por un reactor aeróbico y un clarificador secundario. Cada reactor aeróbico tiene 50 metros de longitud, 36.075 metros de ancho, 6.5 metros de altura total y 6 metros de altura de operación, por lo cual el volumen de operación de cada tanque será de 10,822. 5 m³ y un volumen total de 259,740 m³. En este proceso los microorganismos son mezclados completamente con la materia orgánica y de esta manera metabolizan y estabilizan a los compuestos orgánicos. Mientras los organismos crecen, se mezclan por agitación con aire del sistema de difusores, los organismos individuales se juntan y flocculan para formar una masa microbiana llamada lodo activado. Cada descarga de cada reactor biológico corresponde a un clarificador secundario y se realiza mediante vertederos ubicados en la pared compartida entre ambas estructuras.

El agua clarificada es recolectada mediante tuberías perforadas instaladas al final del tanque clarificador. El nivel de agua en el clarificador se encuentra a 0.05 m por encima de 28 tuberías para permitir que solo el agua clarificada pase a través de ellas y la materia flotante permanezca en la superficie y sea arrastrada por el desnatador. El efluente de los clarificadores secundarios será conducido mediante canales hacia los tanques dobles de contacto de cloro.

C2) Desinfección

Es el proceso de desinfección considerado para reducir la concentración de coliformes totales en el efluente de tratamiento secundario y es la inyección de cloro gas. El efluente de los clarificadores secundarios es transferido hacia uno de 8 tanques dobles de contacto de cloro.

D) Tren de Proceso Químico (TPQ):

A través de este tren se llevará a cabo un proceso fisicoquímico a base de coagulación-floculación mediante la aplicación de FeCl_3 , una sedimentación lamelar¹⁰ (TPQ I) de alta tasa y un sedimentador, el cual eliminará los sólidos suspendidos y parte de los huevos de helmintos presentes en el agua. Seguido del proceso FQ, el efluente será enviado hacia un sistema de filtración mediante filtros de malla rotativos (filtros de tela) para remover el total de los sólidos suspendidos y los huevos de helmintos.

Posterior a la separación que se genera durante el proceso fisicoquímico y la filtración, el agua se incorporará al sistema y se desinfectará por medio de cloro gas para garantizar la remoción de coliformes fecales. El agua residual una vez tratada tendrá dos destinos: Canal Salto-Tlamaco para riego agrícola y el río “El Salto”, de donde derivan algunos canales de riego como el Canal Viejo Requena que descarga sus excedentes en la Presa Endhó.

E) Tratamiento de lodos y cogeneración de energía

Los lodos generados, tanto del TPC como en el TPQ, se espesarán, estabilizarán y deshidratarán. Para ambos trenes se cuentan con dos tipos de espesadores, uno de flotación por aire (DAF)¹¹ y otro gravimétrico¹². Posterior a este proceso ambos los lodos se combinarán y se conducirán hacia la digestión anaeróbica donde se estabilizarán generando biosólidos clase C de acuerdo con la normatividad vigente, con esta clase es factible hacer

¹⁰ De acuerdo con la RAE, se asocia esta palabra a todo aquello que está compuesto por laminillas.

¹¹ El espesador de flotación por aire (DAF) provoca que los sólidos se separen de la fase líquida en dirección ascendente uniendo las partículas de aire con las de sólidos suspendidos por medio de un agente floculante. Es un tratamiento previo a la estabilización y deshidratación de lodos.

¹² En el espesador gravimétrico los lodos se separan de la fase líquida por gravedad, en dirección descendente para colocarse al fondo del espesador. Para lograr que el lodo espese, sea estabilizado y deshidratado debe permanecer 24 horas dentro del espesador gravimétrico.

un reúso para el área forestal, como mejoramiento de suelos y usos agrícolas (CONAGUA, 2012). Simultáneamente durante la digestión anaerobia se genera biogás, el cual se almacenará y se reusará para la producción de energía eléctrica para el autoconsumo de la planta. Los biosólidos generados pasarán a la última etapa de deshidratación para posteriormente ser conducidos hacia la disposición final hacia el monorrelleno (Figura 7).

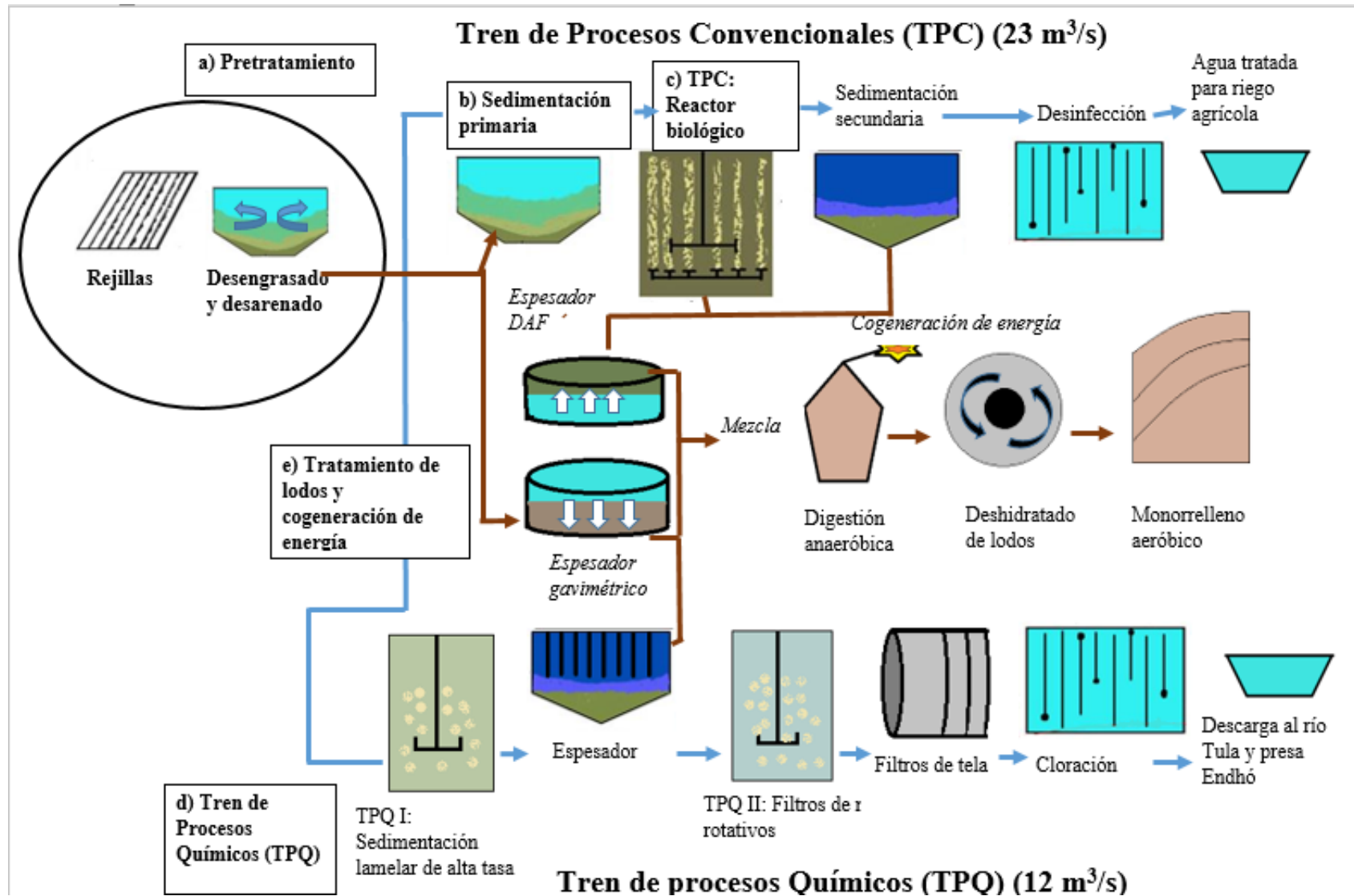


Figura 8. Procesos de tratamiento llevados a cabo por medio de la PTAR Atotonilco. Modificado de Espino de la O, Ernesto (2016). Planeación y gestión de proyectos de PTARS

1.5. Percepción de riesgo ambiental y racionalidad

1.5.1.- Percepción de riesgo ambiental

Los seres humanos son seres sociales por naturaleza que tienen consciencia de su existencia, así como de la interacción que tienen con su entorno (medio ambiente) (Burcu ANILAN, 2014). El ser humano modifica el ambiente de acuerdo con sus deseos para satisfacer sus necesidades, tal como lo dictan los principios de la economía como ciencia social sobre la explotación de los recursos naturales para la satisfacción de sus necesidades. La explotación de la naturaleza ha traído consigo crecimiento y desarrollo económico, pero también problemas ambientales, particularmente después de la revolución industrial (Vitousek, Mooney, Lubchenco, & Melillo, 1997).

En esta nueva era denominada por diversos autores como *Antropoceno* merman los cambios en las economías como resultado de los desarrollos tecnológicos y los incrementos de las necesidades humanas (Sachs, 2008); (Steffen, Will et al., 2011). Actualmente, el mundo enfrenta una complejidad de problemas ambientales denominados también *Síndromes de Cambio Global* (Lüdeke, Petschel-Held, & Schellnhuber, 2004) y están relacionados con la contaminación del aire, suelo, agua, cambio climático, erosión, reducción de la biodiversidad, entre otros; los cuales, ocasionarán grandes riesgos en el futuro.

El riesgo se puede definir desde las ciencias sociales como un sinónimo de peligro y argumenta que los riesgos causados por la modernización causan daño irreparable en el medio ambiente (Beck, 1992). Beck habla de una “sociedad del riesgo”, la cual se configura al no prever las conclusiones de las amenazas, intransigencia e impasibilidad. Este enfoque de sociedad de riesgo se generalizó en la década de los noventa y afirma que el riesgo ocupa un lugar cada vez mayor en la vida y el concepto de riesgo se relaciona con la nueva estructura social compuesta por contenidos sociales, históricos y culturales. También se han realizado estudios de percepción de riesgo (Riechard, 1998), los cuales son importantes para el manejo de riesgo y contribuyen para el desarrollo de estudios orientados a la reducción del mismo. La percepción del riesgo es importante para incrementar la consciencia de la sociedad en la reducción de riesgos ambientales.

1.5.2.- Racionalidad y percepción de riesgo

Para explicar el comportamiento del mercado y de los consumidores la teoría económica neoclásica desarrolló lo que se denomina “Elección racional”, en donde se argumenta que los individuos son racionales y eligen las mejores opciones en el mercado de acuerdo con su presupuesto y al precio de los bienes (Arrow, 1986). Esta teoría, aunque es muy aceptada por la doctrina económica actual es altamente cuestionable, ya que los individuos viven en sociedad y las elecciones individuales pueden beneficiar o afectar a la sociedad en su conjunto. Economistas como Keneth Arrow (1986) han argumentado que los individuos tienen diferentes preferencias entre sí y que no pueden llegar a un acuerdo y elegir racionalmente lo que les conviene.

Por otro lado, Amartya Sen dice que no hay sistemas ideales de elección colectiva que funcionen en todas las sociedades como una receta de cocina. Él argumenta que algunos procedimientos de elección funcionan bien para algunos tipos de elección y preferencias individuales, pero no para otros y que esto depende de la sociedad a la que se apliquen. Al trasladar la racionalidad a la percepción de riesgo, es necesario en primera instancia que los riesgos ambientales le competan a la sociedad en su conjunto y no a los individuos. Por lo anterior, se deben visualizar racionalmente los riesgos ambientales con una perspectiva en donde la sociedad deba trabajar en conjunto para un manejo adecuado y reducción de los mismos (Sen, 1977).

En el Valle del Mezquital existe un riesgo ambiental relacionado con la contaminación de la zona a consecuencia del empleo de agua residual sin tratar en el riego agrícola. Los principales actores que han sido parte de este riesgo son los agricultores, quienes continúan sembrando con agua de una calidad poco propicia que es benéfica para la agricultura y su beneficio económico. Al mismo tiempo, esta práctica representa riesgo de contraer enfermedades para ellos y el resto de la población que aquí habita, por lo cual la racionalidad de los agricultores en esta zona es un tópico que debe conocerse, pues son un grupo de personas que se benefician de un recurso hídrico como el agua residual sin tratar.

El empleo de agua residual sin tratar por parte de los agricultores podría considerarse una práctica racional e irracional desde el punto de vista económico vinculando las dos teorías antes mencionadas. La teoría de “Elección Racional” afirmarí que el individuo busca su máxima utilidad y desde esta perspectiva sería racional que los agricultores obtengan un bienestar económico y minimicen costos de producción dejando de lado los daños colaterales a la población y al medio ambiente. Sin embargo, la teoría de “Elección Colectiva” propuesta por Amartya Sen discrepa con la anterior, pues afirma que un grupo de personas podría ponerse de acuerdo para obtener un beneficio colectivo. Esta última teoría sería más adecuada para la toma de decisiones entre los agricultores, la población y las instituciones gubernamentales con respecto al manejo del sistema hídrico productivo, incluso ahora que se prevé el tratamiento del recurso hídrico.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LOS COSTOS Y BENEFICIOS DEL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DE LA PTAR ATOTONILCO

En este apartado se presenta la metodología de parámetros y entrevistas utilizada en la presente investigación. Debido a que objetivo principal fue evaluar los costos y beneficios que tendrá el tratamiento del agua residual, se emplearon ambas metodologías. Con la metodología de parámetros se calcularon índices de calidad para agua residual y acuífero y de esta manera tener un diagnóstico de los impactos ambientales, sanitarios y productivos. Una vez obtenidos los índices, se procedió a calcular los costos y beneficios reales a través de balances de masa, índices de calidad para agua residual tratada y estimación de costos y beneficios monetarios del tratamiento.

Mientras que la metodología de entrevistas fue de gran utilidad para complementar aspectos históricos del Valle del Mezquital por medio de las respuestas proporcionadas por los jefes de operaciones de los distritos de riego. También fue auxiliar para conocer la percepción de los agricultores sobre el sistema hídrico productivo y los costos y beneficios del tratamiento del agua residual. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los costos y beneficios reales y los percibidos para contrastar ambas metodologías. La Figura 9 muestra la estructura metodológica del presente trabajo de investigación.

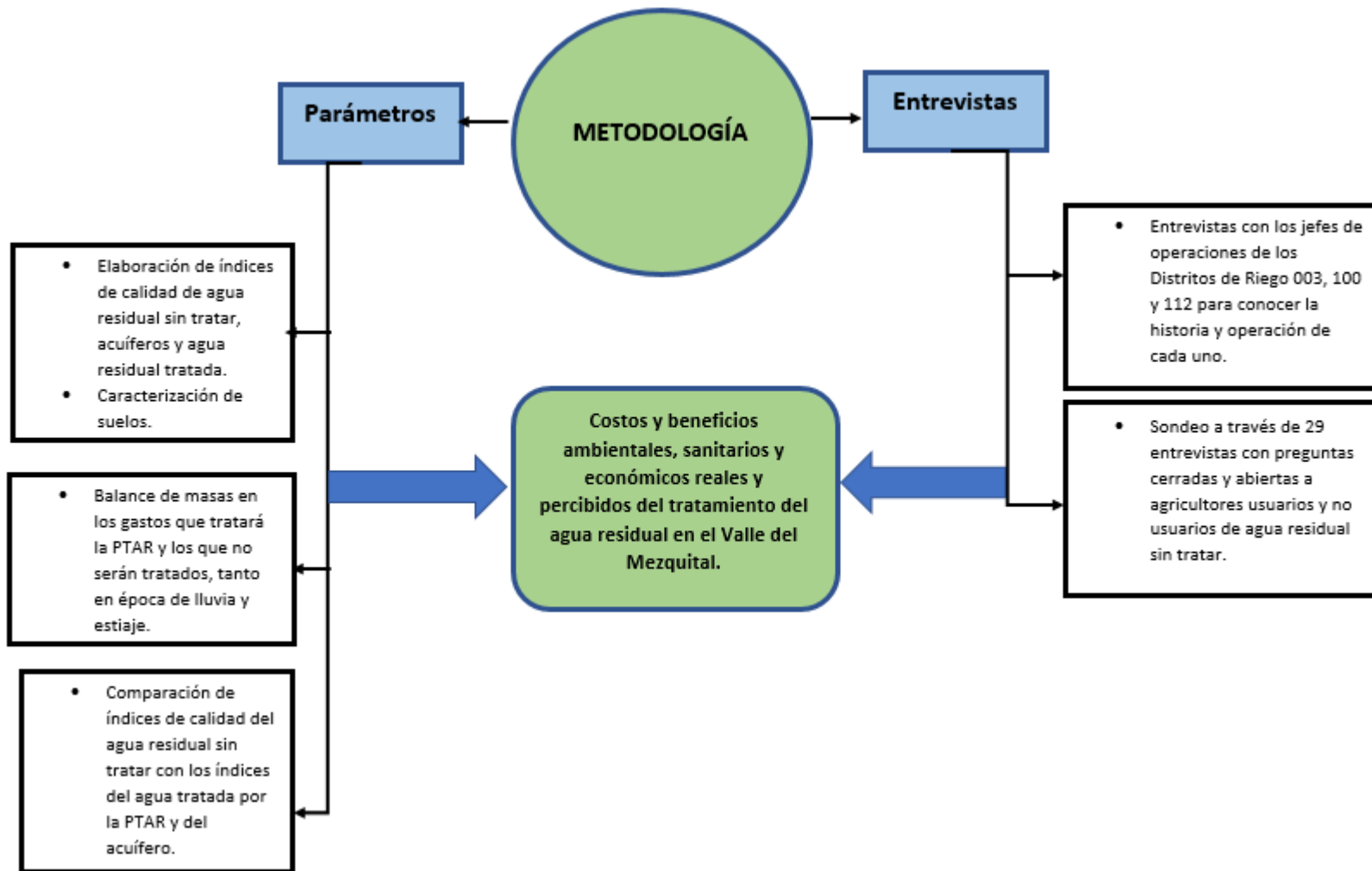


Figura 9. Estructura metodológica de la investigación

2.1.- Metodología de parámetros

2.1.1.- Historia, productividad y amenazas sanitarias del Valle del Mezquital

Para realizar el análisis histórico, de la productividad y amenazas sanitarias del Valle del Mezquital se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la historia del Valle del Mezquital, así como del reúso y recarga del acuífero. Se revisaron estadísticas de municipios y población para determinar la población total del Valle del Mezquital y así conocer el número de personas inmersas en la problemática del reúso y recarga de agua residual. Se obtuvieron estadísticas de CONAGUA sobre la productividad de los distritos de riego 003, 100 y 112 para conjuntar los datos y así obtener datos generales de la productividad del Valle del Mezquital.

En cuanto a las posibles amenazas sanitarias, se buscaron estadísticas el Sistema de Información Georreferenciada del Estado de Hidalgo (SIIEH-SIGEH) para obtener la morbilidad por enfermedades entéricas y la mortalidad por enfermedades renales en los 27 municipios del Valle del Mezquital y se determinaron también estadísticas de seguridad social en el Valle del Mezquital. Se buscó información sobre el gasto público en el sector salud en el Valle del Mezquital, el costo anual de enfermedades renales, así como el gasto de los hogares en salud.

2.1.2.- Caracterización de suelo en el Valle del Mezquital

Se realizó una matriz para caracterizar suelo del Valle del Mezquital con base en datos que han sido reportados para la clase de suelo feozem, el cual representa el 35% del total de 85000 ha (Chávez et al., 2012). Los datos utilizados son valores promedio de nutrientes (fósforo y nitrógeno), % de materia orgánica, salinidad, microorganismos (huevos de helminto y coliformes fecales) y metales pesados (cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc) y salinidad (conductividad eléctrica y pH).

2.1.3.- Elaboración de índices de calidad de agua residual sin tratar, acuíferos y agua residual tratada.

Para la presente investigación se realizó en primera instancia un diagnóstico algunos de los impactos ambientales, sanitarios y productivos que el sistema hídrico-productivo ha ocasionado en el Valle del Mezquital a través de índices para evaluar la calidad del agua residual sin tratamiento, agua del acuífero y agua tratada por la PTAR. Dichos índices se elaboraron a partir de las bases de datos más actuales y completas publicadas en estudios del Instituto de Ingeniería de la UNAM y (Lesser C., 2011). A partir de estas bases de datos se seleccionaron 23 parámetros, los cuales cumplieron con las características necesarias para la investigación al reportarse una mayor cantidad de datos reportados para cada uno y estar normados en los marcos jurídicos nacionales. Los 23 parámetros fueron seccionados en grupos de materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y salinidad durante las épocas de estiaje y lluvia para crear una nueva base de datos a partir de las concentraciones mínimas y máximas de cada uno.

Las NOM-001-SEMARNAT-1996 y Ley Federal en Materia de Agua (LFMA) se utilizaron porque ambas regulan los parámetros que debe contener el agua al ser descargada en bienes nacionales como ríos, embalses y suelo. El agua proveniente de la ZMVM tiene diferentes tipos de contaminantes y es vertida directamente en estos bienes nacionales localizados en el Valle del Mezquital, se requirió comparar las concentraciones mínimas y máximas de los parámetros de calidad del agua con respecto a los LMP.

Se hizo el mismo procedimiento para el agua del acuífero con la NOM-127-SSA1-1994 debido a que, en el Valle del Mezquital acuíferos someros y profundos como manantiales, pozos y norias son utilizados como fuentes de abastecimiento en algunas comunidades (Jiménez C. B. E., 2004), por lo tanto, es agua para uso y consumo humano (Véase Tablas 6 y 7). De igual manera el procedimiento aplicó para el agua residual una vez tratada por la PTAR y los parámetros se elaboraron con respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la Ley Federal de Derechos en Materia de agua, ya que cuentan con LMP para un mayor número de parámetros que la NOM-003-ECOL-1997.

Tabla 6. Matriz de parámetros considerados para el cálculo del índice, agua residual sin tratar. [√]

Grupo	Parámetro	Unidad	Lluvia [√]		Estiaje [√]		LMP
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	NOM 001 SEMARNAT-1996 y LFMA
Materia orgánica	Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	48.67	404	9.44	367.33	50*
	DBO5 (total)	mg/L	38.53	227.39	147.8	569.53	150
	DQO total	mg/L	113	536	135.67	685.67	500*
	Carbono Orgánico Disuelto (COD)	mg/L	18.25	43.13	23	41.7	1.5*
Nutrientes	Fósforo	mg/L	6	47	11.4	136	20
	Nitrógeno total	mg/L	16.22	58.25	5.6	45.03	40
MCO	Coliformes fecales	ULog.	2.6	6.85	6.02	7.51	3
	Huevos de Helminto	HH/L	0.13	20.27	1.93	22	1
Metales pesados	Aluminio	mg/L	6.72	13.54	1.84	5.34	5*
	Cromo	mg/L	N/D	0.04	0.01	0.05	0.1*
	Cobre	mg/L	N/D	0.06	0.02	0.12	0.2*
	Hierro	mg/L	N/D	9.17	1.18	3.74	5
	Plomo	mg/L	N/D	N/D	0.03	0.07	1
	Manganeso	mg/L	0.07	0.36	0.14	0.22	0.2*
	Níquel	mg/L	N/D	0.06	0.02	0.11	0.2*
	Zinc	mg/L	N/D	0.59	0.08	0.53	2*
	Cianuro	mg/L	N/D	0.0092	ND	0.0775	0.02
Salinidad	Boro	mg/L	N/D	0.64	0.34	1.54	0.7*
	Fluoruro	mg/L	N/D	0.451	0.011	1.541	1
	Sólidos Disueltos Totales, SDT	mg/L	409	890	642	1123.33	1
	Conductividad eléctrica	µs/cm ³	1229.67	2362	1854.33	4606.67	N/E

[√] Datos obtenidos con base en II-UNAM (2017). Parámetros para evaluar la calidad del agua residual sin tratar de acuerdo al muestreo realizado en temporada de lluvia y estiaje en 2016. (*) Corresponde a los Límites Máximos Permitidos (LMP) establecidos en la LFMA, ya que son más estrictos. (N/E): no especificado. (N/D): No detectado.

Tabla 7. Matriz de parámetros considerados para el cálculo del índice en el agua de los acuíferos (Datos obtenidos de Lesser, 2011) §

Grupo	Parámetro	Unidad	Acuífero profundo§				Acuífero somero§		LMP NOM - 127-SSA1-1994
			Lluvia		Estiaje		Lluvia		
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Nutrientes	Nitratos	mg/L	N/E	N/E	0.89	12.38	1.88	8.17	10
	Nitrógeno amoniacal	mg/L	0.04	1.27	N/E	N/e	0.0373	5.1234	10
MCO	Coliformes fecales	UFC/100 mL, NMP/100 mL,	N/D	1.1	N/D	4.6	N/E	N/E	0
	Huevos de helminto	(HH/L)	N/D	N/D	N/D	N/D	8	8	0
Metales pesados	Aluminio	mg/L	0.004	0.1337	N/D	N/D	0.0064	0.0104	0.2
	Arsénico	mg/L	0.0073	0.4263	0.02	N/D	0.01	0.04	0.05
	Bario	mg/L	0.0167	0.5461	0.01	0.14	0.04	0.16	0.7
	Cromo	mg/L	0.0036	0.0151	ND	ND	N/D	N/D	0.05
	Hierro	mg/L	0.0039	0.3572	N/D	0.41	0.0041	0.01	0.3
	Manganeso	mg/L	0.0045	0.1543	N/D	0.09	N/D	N/D	0.15
Salinidad	Cloruros	mg/L	N/D	1.1	N/D	4.6	N/D	N/D	1.5
	Sodio	mg/L	53.2	451.4	30.81	429.8	149	297.5	200
	SDT	mg/L	610	2235	213	2830	1066	1296	1000

§ Datos obtenidos con base en Lesser et al., (2011). Balance hídrico y calidad del agua en el acuífero del Valle del Mezquital. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 28(3), 323-336.

Especificaciones de las Tablas 6 y 7 (*) = Los LMP que contienen este asterisco en la Tabla 6 fueron tomados de la Ley Federal en Materia de Agua, ya que son límites más estrictos o reemplazan a los LMP que se encuentran en la NOM-001-SEMARNAT-1996. El resto de los LMP son los que se encuentran en esta última. *Las unidades de cada parámetro para la tabla 6 y 7 son las siguientes:*

mg/L= Miligramo sobre litro, UFC/100 mL= Unidades Formadoras de Colonias sobre 100 mililitros. Son unidades logarítmicas, al igual que su LMP., NMP/100 mL= Número Más Probable sobre 100 mililitros. Expresa lo mismo que las UFC/100 mL, solo que la metodología de conteo es distinta, HH/L= Huevos de Helminto sobre Litro, mg/kg= miligramo sobre kilogramo, UFC/g= Unidades formadoras de colonias sobre gramo, NMP/g= Número más probable sobre gramo, HH/g= Huevos de Helminto sobre gramo; MCO (microorganismos).

Se estableció una fórmula general para la elaboración de los índices, la cual se muestra a continuación:

Fórmula general para elaboración de índices de calidad de agua residual sin tratar, acuífero y agua residual tratada.

La fórmula general utilizada para elaborar los índices de calidad fue el cociente y se expresa de la siguiente manera:

$$IC(X) = \frac{conc \text{ min } \text{ ó } \text{ max}}{LMP *}$$

donde:

IC=Índice de calidad de agua residual sin tratar o acuífero.

X= Parámetro de calidad considerado

Conc min/max= concentración mínima y concentración máxima del parámetro evaluado.

LMP*= Límite Máximo Permisible establecida en la norma utilizada y la zona en la que se aplica ya sea agua residual sin tratar o acuífero.

Los parámetros fueron graficados por grupos de interés, materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y sales. Al momento de graficar los Índices, se establece que el LMP para cada parámetro es 1. Un índice más cercano a 0 (cero) significa una mejora en la calidad del agua, pues establece que los parámetros no rebasan los LMP utilizados. Mientras que un índice cercano a 1 (uno) significa que la calidad del agua es menor, si este valor rebasa el 1 indica que es una muy mala calidad del agua. Cada uno de estos valores fueron graficados para cada parámetro.

Similar al procedimiento anterior se elaboraron los índices de calidad para agua residual tratada por la PTAR Atotonilco, solo que a las concentraciones mínimas y máximas de cada uno de los parámetros se les aplicó el porcentaje de remoción de acuerdo al tipo de tratamiento ya sea biológico fisicoquímico. Se tomaron como concentraciones finales los remanentes obtenidos del porcentaje de remoción para cada parámetro y de esta manera se obtuvieron los índices de calidad para agua residual tratada.

Al final se obtuvieron 18 índices de calidad del agua residual sin tratar, 15 para el agua residual una vez tratada y 10 para el agua del acuífero. Estos índices, más allá de dar a

conocer la calidad del agua residual en tres momentos diferentes (sin tratar, una vez tratada y el acuífero), proporcionan datos para explicar los impactos ambientales, sanitarios y productivos antes y después del tratamiento; ya sea, después de un proceso natural como lo es el SAT en el acuífero o un proceso mecanizado por medio de la PTAR. Además, una comparación entre ellos permite conocer la eficiencia de remoción de un proceso natural como es el SAT y un proceso mecanizado como la PTAR.

2.1.4.- Balance de masas en los gastos que tratará la PTAR y los que no serán tratados tanto en época de lluvia como de estiaje.

Para evaluar la cantidad de contaminantes que serán incorporados al suelo a través del riego como los patógenos, parámetros benéficos para la productividad y sales se realizó un balance de masas de las concentraciones contenidas en los diferentes grupos de parámetros, las cuales finalmente fueron expresadas en kilogramo por hectárea al año (kg/ha) al año. El procedimiento se realizó considerando un gasto (flujo) de 52 m³/s para el influente (flujo de descarga), 23 m³/s para el efluente (flujo de descarga) tratado por el TPC para las temporadas de de lluvia y estiaje respectivamente, así como los 12 m³/s del flujo tratado por el TPQ en temporada de lluvia. Así mismo, se realizó el balance de masas a los gastos que no serán tratados por la PTAR (en ambas temporadas), los cuales fueron de 29 m³/s y 17 m³/s en ambas temporadas, respectivamente.

En la Tabla 8 se muestra a manera de ejemplo el procedimiento para el parámetro de Sólidos Suspendidos Totales (SST) con su concentración mínima en estiaje en mg/L. Primeramente se determinó la concentración de SST en Ton /m³ por medio de un cociente¹³, después se determinaron los m³ al año por medio de un producto¹⁴ Las toneladas al año se obtuvieron del producto de (Ton/m³*m³ al año) y las toneladas por hectárea del cociente ((Ton/año) /85000 hectáreas que se riegan en el Valle del Mezquital). Finalmente, se obtuvo el dato de kg/ha al año por medio del producto (Ton/ha*1000¹⁵). Esta última unidad (kg/ha) expresa la tasa de aplicación al suelo de cada parámetro. Este procedimiento de balance de

¹³ Tonelada es igual a 1000 kg, 1 kg es igual a 1000 g y 1 g es igual a 1000 mg.

¹⁴ En el caso del flujo de entrada el producto fue igual a 52 m³/s*60 segundos (1 minuto) *6 minutos (1 hora) *24 (un día)*182.5 (días de la temporada de estiaje).

¹⁵ 1 tonelada es igual a 1000 kg.

masas se realizó para los 23 parámetros de calidad del agua utilizados para la elaboración de índices en ambas temporadas considerando los flujos de entrada para cada una de estas, así como para los flujos tratados y no tratados, excepto los coliformes fecales, los cuales no se pueden calcular al estar expresados en unidades logarítmicas a las cuales no se les puede aplicar el mismo procedimiento que a los HH/L y los mg/L de la mayoría de los parámetros.

Tabla 8. Ejemplo de balance de masa de los SST en temporada de estiaje para el flujo de 52 m³/s (Concentración mínima en el influente)

Parámetro	Unidad	Concentración min. influente	Ton/m ³	m ³ /temporada	Ton/año	Ton/ha	kg/ha
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	mg/L	9.44	9.4X10 ⁻⁶	819936000	7743.84	0.091104	91.104

Para elaborar los balances de masas de los parámetros que estarán presentes en el efluente de la PTAR, se realizó un procedimiento similar al balance de masas en los flujos de entrada, con cambios solo en los datos empleados. Por ejemplo, para los flujos en estiaje y lluvia se ocuparon los que serán tratados por la PTAR, 23 m³/s en ambas temporadas (TPC) y 12 m³/s en lluvia (TPQ). Otra diferencia en el procedimiento fue que se aplicaron los porcentajes de remoción para cada parámetro de acuerdo con la tecnología que tiene cada tren de tratamiento.

Es importante recordar que el TPC operará con una tecnología de lodos activados y el TPQ con coagulación-floculación con dosis de cloruro férrico (FeCl₃) de 20-25 mg/L. Los resultados considerados para el efluente en ambas temporadas se obtuvieron al llevar a cabo una sustracción¹⁶, teniendo como resultado final un remanente. En la Tabla 9 se pueden observar los porcentajes de remoción para la tecnología de lodos activados con referencia en literatura; en la Tabla 10 se muestra un ejercicio con los resultados del balance de masas para la remoción SST en temporada de estiaje; en la Tabla 11 se pueden observar los porcentajes de remoción de algunos parámetros con la tecnología de coagulación-floculación.

¹⁶ La resta en cuestión para cada parámetro tiene la siguiente fórmula general:

$$R = D(e) - D(r)$$

Donde: R= Remanente; D (e) = Dato obtenido del balance de masas en el flujo de entrada expresado en (kg/ha); y,

D (r) = dato obtenido del porcentaje de remoción aplicado a cada parámetro).

Tabla 9. Remoción de parámetros de interés con la tecnología lodos activados

Grupo	Parámetros	Lodos activados	Porcentaje de remoción reportado y considerado para el cálculo del índice
		etapa de tratamiento	
MCO	Coliformes fecales y Huevos de Helminto	Reactor biológico y clarificación secundaria	73-81% (*)
		Desinfección	99.90% (**)
Materia orgánica	Sólidos suspendidos totales	Reactor biológico y clarificación secundaria	99% (***)
	DBO ₅		90-95% (****)
Nutrientes	Nitrógeno	Tratamiento incluyendo desnitrificación	70%-90% (****)
	Fósforo		30%-90% (****)
Metales pesados	Plomo	Reactor biológico	95-98%
	Cadmio		95-98%
	Boro		95-98%
	Selenio		95-98%
	Hierro		95-98%
	Níquel		95-98%
	Zinc		95-98%
	Cromo		95-98%
	Mercurio		95-98%
	Cobre		95-98%
	Cianuro		96.80%
Sales	SDT	99%	
	Sulfato	95%	
	Fluoruro	95%	

Elaboración propia con base en (Nájera F., 2012) (*), (CEPIS, Tratamiento de agua para consumo humano. Manual 1: Teoría, 2004) (**), (Metcalf & Eddy, 1996) (***), (CONAMA-Gobierno de Chile, 2017) (****).

Tabla 10. Balance de masas de SST en temporada de lluvia y estiaje (TPC) para el flujo tratado de 23 m³/s (Carga mínima del efluente)

Parámetro	Unidad	Conc. min influente	% remoción	Remanente min	Ton/m ³	m ³ /año	Ton/año	Ton/ha	kg/ha
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	9.4	95%	0.472	4.7X10 ⁻⁷	725,328,000	342.5	0.00403	4.03

Para el caso del proceso fisicoquímico se consideraron los porcentajes de remoción basados en datos experimentales realizado para el agua residual del Emisor Central en el año 1996, con la aplicación de una dosis de 20-25 mg/L de FeCl₃. Dichos porcentajes de remoción con esta dosis fueron aplicados al flujo de 12 m³/s y a las concentraciones mínimas y máximas de microorganismos, materia orgánica, nutrientes, metales pesados y sales en temporada de lluvia (medio año) (Tabla 11)

Tabla 11. Remoción de los parámetros de interés en el tratamiento fisicoquímico por medio de dosis de 20-25 mg/L de Cloruro férrico (FeCl₃), agua residual tratada del Emisor Central

Grupo	Parámetro	Porcentaje de remoción
Microorganismos	Coliformes fecales y Huevos de Helminto	58.6% (*)-99.9% (**)
		99.90%
Materia orgánica	Sólidos suspendidos totales (SST)	67% (*)
	DBO ₅	85%
Nutrientes	Nitrógeno	10.70% (*)
	Fósforo	24.30% (*)
Metales pesados	Plomo	90%
	Cadmio	90%
	Boro	98%
	Níquel	63%
	Zinc	83%
	Cromo	96%
	Cobre	97%
Sales	Fluoruro	80%
	SDT	(*)

Elaboración propia con base en Datos experimentales con 20-25 mg/L de FeCl₃ en tratamiento fisicoquímico del agua residual del Emisor Central (*) y (CEPIS, Tratamiento de agua para consumo humano. Manual 1: Teoría, 2004). Tratamiento de agua para consumo humano, tomo 1 teoría. (*) Los SDT se incrementarán al aplicarse FeCl₃, ya que es una sal. ** Posterior a la etapa de desinfección.

2.1.5.- Comparación de los índices de calidad del agua residual sin tratar con los índices del agua residual tratada por la PTAR y del acuífero.

Finalmente, en cuanto a la metodología cuantitativa se hizo una comparación entre los índices de calidad del agua residual sin tratar, para el agua residual tratada por la PTAR de calidad el agua del acuífero (proceso de tratamiento natural). Con estos índices se pudo conocer los cambios en la calidad del agua para cada parámetro después y de los tratamientos biológico y fisicoquímico llevados a cabo por la PTAR y los del SAT.

2.2.- Metodología de entrevistas

2.2.1.- Entrevistas con los jefes de operaciones de los distritos de riego 003, 100 y 112 para conocer la historia y operación de cada uno.

Antes de acudir a los tres distritos de riego del Valle del Mezquital para la aplicación de entrevistas se identificaron posibles actores clave para conocer la percepción del sistema hídrico productivo. Se determinó que, por el hecho de estar en contacto directo con el agua de riego y la producción agrícola, los agricultores son los principales actores clave. Para que la aplicación de entrevistas tuviera un contraste se debía conocer la opinión de los agricultores que tienen contacto con el agua residual sin tratar y de aquellos que no tienen contacto. Se procuró que los agricultores fueran residentes de municipios correspondiente a los distritos donde por un lado se lleva a cabo el riego con agua residual sin tratar; y, por otro lado, municipios pertenecientes a los distritos de riego donde se siembra sin empleo de este tipo de recurso hídrico. Se considero de vital importancia presentarse en primera instancia con los jefes de operaciones de cada distrito para poder dirigirse a los agricultores.

Se realizaron visitas a los tres distritos de riego para presentarse con los jefes de operaciones de cada uno de estos distritos, pues al igual que los agricultores ellos se consideran actores clave, ya que gestionan el manejo del agua residual. Se requirió que estas personas facilitaran al acercamiento con los agricultores por medio de la identificación de comunidades clave para realizar las entrevistas y una vez proporcionada esta información facilitar contactos en las comunidades por visitar. Posteriormente se procedió a aplicarles entrevistas para conocer más sobre la historia y como opera cada distrito de riego en el Valle del Mezquital, ya que se requirió complementar la información histórica de cada uno de los distritos. En el mes de julio de 2016 se programaron las visitas a las sedes de CONAGUA en el Valle del Mezquital, Mixquiahuala de Juárez para el DR003, Ixmiquilpan para el DR100 y Ajacuba para el DR112. El formato de las entrevistas realizadas a los jefes de operaciones se encuentra en los anexos de este trabajo.

2.2.2.- Sondeo a través de 29 entrevistas con preguntas cerradas y abiertas a agricultores usuarios y no usuarios de agua residual sin tratar.

Se aplicaron 29 entrevistas estructuradas con preguntas cerradas y abiertas a agricultores en localidades clave de los tres distritos de riego recomendadas por los jefes de operaciones de estos distritos (Tabla 12). En cada distrito existen comunidades que emplean agua residual sin tratar en su totalidad y comunidades en donde emplean otro tipo de agua, incluso a pocos kilómetros. La cantidad de entrevistas realizadas no se determinó como óptima, en realidad se planeaban aplicar 36, pero no todos los agricultores estuvieron de acuerdo para ser entrevistados. Las personas entrevistadas fueron elegidas como ya se ha mencionado al inicio de este apartado, por su relación con el agua residual sin tratar, agricultores que tienen contacto y que no tienen contacto. El formato de la entrevista se encuentra en los anexos de este trabajo.

Antes de realizar las entrevistas se informó a cada participante sobre los objetivos del proyecto de investigación, así como la confidencialidad de los datos a proporcionar de cada uno. La entrevista fue dividida en tres secciones: productividad, percepción de riesgo y saneamiento. En la sección de productividad se obtuvo información sobre la propiedad, si se dedican a otras actividades aparte de la agricultura, el tipo de cultivos que siembran ya sea forrajes u otro tipo de cultivos como legumbres y hortalizas.

También se obtuvieron resultados sobre el tipo de agua que emplean en el riego, agua residual sin tratar cruda, agua residual sin tratar mezclada o de retorno agrícola, agua de pozo, manantial, albercas o presa que no contiene agua residual sin tratar. En la sección de percepción de riesgo se obtuvieron resultados sobre la perspectiva que los agricultores tienen sobre si el empleo de agua residual sin tratar implica o no un riesgo. Finalmente, en la sección de saneamiento se obtuvieron resultados sobre el conocimiento de los agricultores acerca del proyecto de la PTAR Atotonilco y los beneficios que esta traerá a la zona.

Tabla 12. Localidades clave para las entrevistas

Localidad	Distrito de Riego	Usuarios de agua residual sin tratar	No usuarios (Agricultura de temporal, agua de pozo, manantial, etc).
Mixquiahuala de Juárez	Tula (003)	6	
Santa María Magdalena	Tula (003)		6
Ixmiquilpan	Alfajayucán (100)	6	
Maguey Blanco	Alfajayucán (100)		2
Ajacuba	Ajacuba (112)	6	
Benito Juárez	Ajacuba (112)		3

2.3. Análisis de los resultados

La metodología de análisis para los datos cuantitativos fue a través de estadísticas productivas y de posibles amenazas sanitarias en el Valle del Mezquital. También se elaboraron índices de calidad del agua residual sin tratar y el acuífero. Posteriormente se analizaron las cargas de materia orgánica, nutrientes, microorganismos y sales tanto en los efluentes de la PTAR como en los gastos no tratados. Finalmente se hizo una comparación de los índices del agua residual sin tratar, agua residual tratada y el acuífero para obtener los datos reales de los costos y beneficios de la PTAR. En cuanto a la metodología de análisis para los datos cualitativos, las entrevistas a los jefes de operaciones complementaron el análisis histórico y de operación de los distritos de riego del Valle del Mezquital. Las entrevistas a los agricultores permitieron realizar un análisis comparativo entre datos reales y los percibidos sobre la productividad, percepción de riesgo y saneamiento.

Diagnóstico

Historia y operación de los distritos de riego

En primera instancia se expone la historia del Valle del Mezquital y de la operación de los distritos de riego con base en bibliografía y entrevistas a los jefes de operaciones de cada distrito. Se explica brevemente como es la gestión del agua a través de módulos de riego.

Caracterización de suelo

Los datos presentados para nutrientes, materia orgánica y salinidad se compararon con los valores de referencia reportados por Chávez et al., (2012); mientras que los microorganismos y metales pesados fueron comparados con lo establecido en la NOM.004-SEMARNAT, 2002. Lo anterior se realizó de esta manera, ya que los valores de referencia se complementan en ambas fuentes. La NOM.004-SEMARNAT, 2002 contiene valores para lodo tipo C, los cuales tienen características muy similares a los suelos del Valle del Mezquital, al tener un contenido similar de microorganismos y metales pesados.

Productividad de los DR003, DR100 Y DR112

Se analizó la productividad de estos distritos de riego en el periodo 1997-2014 por medio de las variables número de usuarios, producción (miles de toneladas), Precios Medios Rurales (P.M.R.= \$/Ton) y ganancias (miles de pesos). También se determinaron los cultivos más sembrados en el Valle del Mezquital, así como sus precios de mercado por tonelada.

Amenazas sanitarias

Se obtuvo la morbilidad por enfermedades entéricas y mortalidad sobre enfermedades renales y se compararon los números de casos para ambas anualmente en el Valle del Mezquital. Se determinó el costo de la enfermedad renal anual en esta misma zona y el riesgo que implica padecer este tipo de enfermedades con base en el porcentaje de seguridad social y costos en salud.

Impactos del empleo del agua residual sobre el suelo

Se concluye este primer apartado exponiendo los impactos ambientales, sanitarios y productivos que el agua residual sin tratar ha generado en los suelos.

Índices de calidad del agua residual sin tratar e impactos por el empleo de la misma.

En esta sección se analizaron los índices obtenidos para calidad del agua residual sin tratar en temporada de lluvia y estiaje. Los índices se estudiaron por grupos de parámetros: microorganismos, metales pesados, materia orgánica, nutrientes y salinidad. Una vez realizado este análisis se resumen los impactos del Agua residual sin tratar en la zona del Valle del Mezquital de la misma manera que los impactos en el suelo.

Caso de estudio

Costos y beneficios de ambientales, económicos y de salud que tendrá el tratamiento del agua residual que tendrá el megaproyecto PTAR Atotonilco.

En este apartado se analizaron los costos y beneficios que tendrá la PTAR Atotonilco en el Valle del Mezquital por medio de balances de masa de las cargas al final del tratamiento en los efluentes. Se analizaron los mismos grupos de interés que en el diagnóstico: materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y salinidad. Se analizan de manera similar los balances de masa en los gastos que no serán tratados por la PTAR.

Comparación de datos cuantitativos

Índices de calidad para el agua del acuífero e impactos del empleo de agua residual en el acuífero.

Se realizó un procedimiento de análisis similar al de los índices de calidad del agua residual sin tratar, solo que en este análisis no se obtuvieron datos de materia orgánica. Al final de la exposición de los índices, se resumen los impactos el empleo de agua residual en el acuífero.

Comparación de los índices de agua residual sin tratar con el agua residual tratada por la PTAR Atotonilco y la remoción del SAT.

Se compararon los índices de calidad para el agua residual sin tratar, los índices de calidad para el agua residual tratada y los índices de calidad para el agua del acuífero para conocer las variaciones de la eficiencia de remoción del proceso natural SAT en el acuífero y la remoción mecanizada por medio de la PTAR.

Resumen de los impactos ambientales, sanitarios y económicos del reúso, recarga y tratamiento de agua residual en el Valle del Mezquital.

Se expone a manera de resumen comparativo los impactos ambientales sociales y económicos del reúso, recarga y tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital.

Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en los rubros ambiental, sanitario y económico del tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital

Con base en los resultados de la metodología de parámetros se estimaron y analizaron algunos costos y beneficios ambientales, sanitarios y económicos del tratamiento del agua, lo cual se puede observar en las Tablas 13, 14 y 15. Para los costos y beneficios sanitarios se consideró determinar las tasas de morbilidad por enfermedades entéricas y de mortalidad por insuficiencia renal crónica (IRC) en el Valle del Mezquital. Se investigaron los gastos anuales en salud de los hogares y del sector salud para ambos tipos de padecimientos, así como los porcentajes de reducción de parámetros de coliformes fecales, huevos de helminto y metales pesados para determinar los posibles beneficios. Con base en lo anterior se obtuvieron los posibles beneficios monetarios y las reducciones de las tasas de morbilidad y mortalidad (ver Tabla 13).

Para la estimación de los costos productivos se consideraron los requerimientos de materia orgánica que proporciona el agua residual y de los nutrientes nitrógeno y fósforo. Se calculó el porcentaje adicional de aportación e relación con los requerimientos de estos parámetros que proporciona el agua residual sin tratar. Para los costos actuales en inversión de fertilizantes se consideró la inversión promedio para 4 hectáreas proporcionada por los agricultores entrevistados, ya que la mayoría tienen esta superficie de tierras. Para calcular los posibles incrementos en costos de producción se multiplicó la inversión promedio antes del tratamiento por el porcentaje promedio de reducción de materia orgánica y nutrientes

anualmente. Este porcentaje se adicionó a la inversión promedio de materia orgánica y nutrientes y se obtuvo un promedio, cifra que es el posible incremento promedio anual de la inversión en fertilizantes (ver Tabla 14).

Para la estimación de costos y beneficios monetarios en el rubro ambiental se investigó en primera instancia el costo de tratar 1 m³ de agua residual por medio de la PTAR y se multiplicó por el total de m³ que serán tratados al año, lo que dio como resultado el costo anual de tratamiento. Adicionalmente se estimó el ahorro de algunos hogares del Valle del Mezquital que presumiblemente se benefician de las fuentes de abastecimiento creadas a partir de la recarga del acuífero. Para esto, se consideró un tercio de la población del Valle del Mezquital, ya que se puede inferir que en su mayoría los habitantes del DR100 abastecen su demanda de agua de manantiales, pozos y norias. Se multiplicaron los hogares correspondientes a un tercio de la población del Valle por la tarifa mínima de pago por servicio de agua potable y se obtuvo el posible ahorro de esta población en este servicio (ver Tabla 15).

Tabla 13. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro de salud

RUBRO	Padecimientos	Tasa de morbilidad (a) y tasa de mortalidad (b) actuales	Costos actuales Anuales sin tratamiento (CAST)	↑ O ↓ de costos con tratamiento (CCT)	↑ O ↓ de beneficios con tratamiento (BCT)	↑ o ↓ de las tasas de morbilidad (a) y mortalidad (b)
SALUD	Enfermedades entéricas (Infecciones entéricas y parasitarias) (a)	(No. total de casos anuales en el Valle del Mezquital / No. total de casos anuales en el Estado de Hidalgo)	(No. total de casos*Gasto de los hogares en enfermedades entéricas al año)	(CAST*porcentaje de remoción promedio de coliformes fecales y huevos de helminto al año)	(CAST-CCT)	(a - % de remoción)
	Enfermedades crónicas asociadas a metales pesados (b)	No. total de muertes anuales en el Valle del Mezquital / No. total de casos anuales en el Estado de Hidalgo	Número total de casos*Gasto de los hogares en IRC al año	(CAST*porcentaje de remoción promedio de metales pesados al año)	(CAST-CCT)	(b-% de remoción)

Tabla 14. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro productivo

RUBRO	Insumos aportados por el agua residual sin tratar	Requerimiento (kg/ha al año**)	Porcentaje de aportación con respecto a requerimientos	Costos actuales sin tratamiento (*)	↑ o ↓ de costos con tratamiento
PRODUCTIVO	Materia orgánica	(Porcentaje de materia orgánica en suelo feozem)	Porcentaje de materia orgánica en feozem del Valle del Mezquital	Inversión promedio en fertilizantes referida por los agricultores entrevistados para 4 ha (*)	(Inversión promedio en fertilizantes*% de disminución de materia orgánica)
	Nitrógeno (**)	(Rendimiento del maíz (ton/ha) *requerimiento de nitrógeno (ton/ha))	Aportación de nitrógeno del agua residual sin tratar/Requerimiento		(Inversión promedio en fertilizantes* % de disminución de nutrientes)
	Fósforo (**)	(Rendimiento del maíz (ton/ha) *requerimiento de nitrógeno (ton/ha))	Aportación de fósforo del agua residual sin tratar/Requerimiento		
				Total	Promedio de la inversión

Tabla 15. Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en el rubro ambiental

RUBRO	Costo del agua residual tratada (\$/m ³)	m ³ tratados anualmente por la PTAR	Costo anual del agua residual tratada	Recarga del acuífero mediante el SAT	Hogares beneficiados por la recarga	Precio del agua potabilizada (\$/m ³)	Ahorro en agua potable (millones de \$)
AMBIENTAL	Costo referido en la memoria documental de la PTAR	Dato obtenido en el balance de masas	(Costo del agua residual tratada*m ³ tratados anualmente)	Dato referido en bibliografía	1/3 de la población del Valle del Mezquital	Dato referido en Comisión de Agua y Alcantarillado de sistemas municipales	(Hogares beneficiados por la recarga*precio del agua potabilizada)

Percepción del sistema hídrico productivo por parte de los agricultores del Valle del Mezquital

Para analizar la percepción de los agricultores del Valle del Mezquital sobre la productividad, riesgo sanitario y saneamiento de la zona se decidió cerrar las preguntas abiertas y cuantificar las respuestas de los entrevistados por medio de porcentajes y de la relación de las respuestas obtenidas con el subtotal (tienen contacto (18) /no tienen contacto (11)) o total de entrevistados (29 agricultores). Los resultados fueron útiles para realizar una comparación con los datos reales obtenidos de los índices para calidad del agua residual sin tratar, acuífero y agua residual tratada, así como los balances de masa en los efluentes y en gastos no tratados.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describen y discuten los resultados obtenidos en la investigación. A continuación, presenta el análisis histórico, productivo y sanitario de los distritos de riego del Valle del Mezquital los cuales son parte del sistema hídrico-productivo. Posteriormente se realiza un diagnóstico de los impactos ambientales, sanitarios y productivos que el sistema hídrico-productivo ha ocasionado en el Valle del Mezquital a través de los índices obtenidos de 23 parámetros de materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y sales en agua residual y acuífero.

3.1.- Análisis histórico, de la productividad y amenazas sanitarias del Valle del Mezquital

3.1.1.- Historia y operación de los DR003, DR100 y DR112.

El Valle del Mezquital está conformado por 27 municipios (Anexo A), los cuales en conjunto cuenta con 643,490 habitantes. En cuanto a población, el Valle del Mezquital representa el 22.5% del Estado de Hidalgo (INEGI, Cuentame INEGI, 2017), casi la cuarta parte de la población del estado. El Valle del Mezquital es la región del Estado de Hidalgo con mayor desarrollo económico impulsado por la industria donde sobresale el corredor industrial Atitalaquia-Tula-Tepeji en donde se encuentra la Refinería de Petróleos Mexicanos (PEMEX), La termoeléctrica de Comisión Federal de Electricidad (CFE), empresas del ramo textil y acero, entre otros (CEPIS, Sistemas integrados de tratamiento uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial., 2002). La zona del Mezquital es también una zona productiva gracias al riego con agua residual, actualmente recibe cerca de 987,699.8 miles de m³ (52 m³/s) al año los cuales se distribuyen en tres Distritos de Riego (CONAGUA, Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego 2013-2014, 2016)

El agua residual sin tratar llega por el Emisor Central al Canal Salto-Tlamaco y el Canal Viejo-Requena, y ahí se distribuye a los diferentes canales de riego primarios (676.7 km) y laterales (564.8 km). El Distrito de Riego Tula (DR003) es el más próximo al Emisor Central y al Canal Salto-Tlamaco, por lo cual es el primero en abastecerse de agua residual sin tratar. A través de la distribución por medio de canales, el agua residual sin tratar se deposita en el Río el Salto, el Río Tula, la Presa Requena y la Presa Endhó. A través de estos cuerpos de agua, el recurso hídrico llega a al Distrito de Riego Alfajayucán (DR100) y se

deposita en el canal de riego Xhotó, las presas Vicente Aguirre, Debodhe y Javier Rojo Gómez¹⁷.

En cuanto al Distrito de Riego Ajacuba (DR112), el agua residual sin tratar llega en su mayoría por el Gran Canal de Desagüe y también se abastece de las presas Endhó y Refugio (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016). A continuación, se describen algunos aspectos históricos de los tres Distritos de Riego del Valle del Mezquital.

A) Distrito de Riego Tula (DR003)

El Distrito de Riego 003 es el tercero más antiguo a nivel nacional. Formado en 1904, se localiza en la parte sur del Estado de Hidalgo, a 100 km al norte de la Ciudad de México y a 70 km de la ciudad de Pachuca. El clima en este distrito es seco semiárido, aunque hay clima templado en algunas localidades del municipio de Tepeji del Río (INEGI, Cuentame INEGI, 2016). El DR 003 es el más extenso del Valle del Mezquital, recibe agua residual del Emisor Central, y los cuerpos de agua y embalses artificiales que interactúan con el agua residual son varios. Destacan el Río el Salto y la Presa Requena en Tepeji del Río, Río Tula desde los municipios de Cd. Cooperativa Cruz Azul hasta Ixmiquilpan y la presa Endhó que conecta al DR003 con el DR100 (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016).

De acuerdo con CONAGUA, el DR003 se divide en doce módulos de riego¹⁸ (Figura 10), los cuales reciben agua residual. Los módulos de riego son subdivisiones de los distritos de riego y el manejo del agua residual se gestiona y se programa de acuerdo a las hectáreas de cultivo y los requerimientos de agua de cada parcela. Este Distrito de Riego es también el más estudiado del Valle del Mezquital, por su amplitud, antigüedad y productividad. Actualmente, a consecuencia de los problemas sanitarios y de salinidad resultado del reúso de agua residual, se ha construido la PTAR Atotonilco que pretende eliminar gran parte de los contaminantes que llegan a este Distrito de Riego (Ibidem, 2016).

¹⁷ En la fase de flujo de agua residual sin tratar que va del DR003 al DR100 se lleva a cabo el Tratamiento Suelo-Acuífero (SAT).

¹⁸ Un módulo de riego es el caudal continuo de agua que requiere una hectárea de cultivo (CONAGUA, 2017).

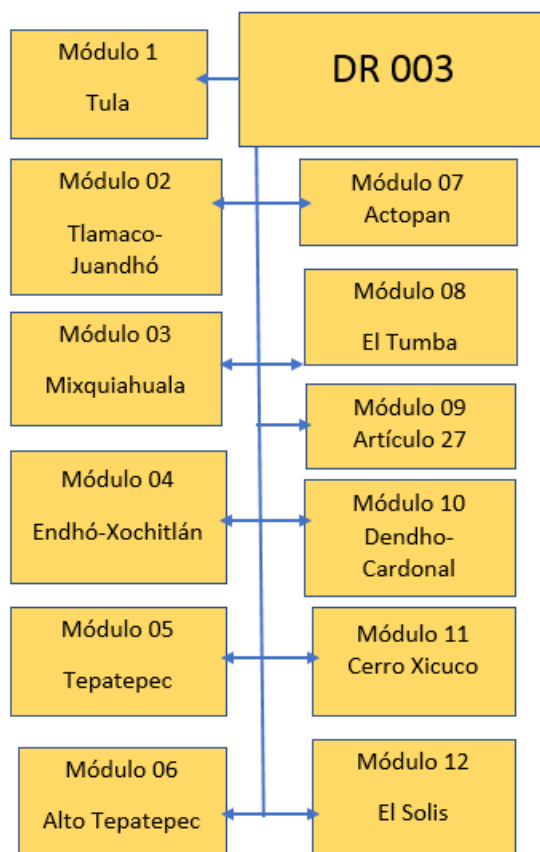


Figura 10. Estructura del Distrito de Riego Tula (003). Fuente: (CONAGUA, SISTAG-CNA. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas., 2016)

B) Distrito de Riego Alfajayucán (DR100)

El Distrito de Riego Alfajayucán fue el segundo en fundarse en el Valle del Mezquital. En 1943 inició operaciones su antecesor, el Distrito de Riego Ixmiquilpan (27), el cual aprovechaba el agua de la presa Endhó, Javier Rojo Gómez y Vicente Aguirre. Posteriormente desaparece este distrito y en 1978 se crea el Distrito de Riego Alfajayucán (100) (Peña, 1998). Este distrito es regado directamente por derivación del Río Tula, y el riego se fue dando como en el distrito 003. Al igual que en el DR anterior, la gestión y administración del agua dentro de las parcelas se realiza mediante siete módulos de riego (Figura 11), de los cuales dos módulos de Ixmiquilpan y uno de Tasquillo son derivados del Río Tula, tres módulos más son regados por la presa Endhó en apoyo con dos presas (Rojo Gómez y Vicente Aguirre). El último módulo se riega con agua de retorno agrícola (Canal

del Xhotó) que maneja agua con mayor calidad en cuanto al contenido de SST, DBO₅ y microorganismos, derivado de ello, en este distrito se cultivan primordialmente hortalizas, verduras y legumbres (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016).

En el distrito 100 hay grupos representativos de agricultores a los cuales CONAGUA les autoriza sus planes de riego y volúmenes con base en la disponibilidad de agua y número de hectáreas. (Ibidem, 2016). En los municipios de este Distrito de Riego también se encuentra el grupo étnico Otomí. Una parte de esta población son usuarios del sistema de riego, otros más ocupan el agua de manantiales y albercas, ya que en estos municipios son muy populares el ecoturismo y los parques acuáticos (Ibidem, 2016).

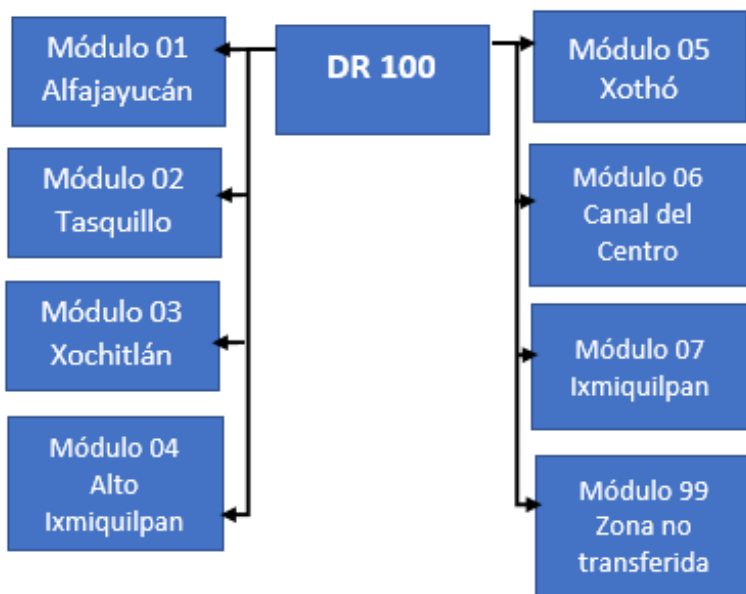


Figura 11. Estructura del Distrito de Riego Alfajayucán (100). (CONAGUA, SISTAG-CNA. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas., 2016).

C) Distrito de Riego Ajacuba (DR112)

El Distrito de Riego 112 es el de más reciente creación en el Valle del Mezquital y se adhiere al distrito 003 en el año 1985. Por cuestiones administrativas se separa del distrito 003 en el año 2000 (CONAGUA, Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego 2013-2014, 2016). El agua residual que llega a este proviene del Gran Canal de Desagüe (anteriormente túneles de Tequisquiac) y baja por el Rio Salado, la presa el Refugio deriva y riega una parte de este distrito. En el DR112 se producen forrajes (maíz y alfalfa) y el autoconsumo oscila entre 15 y 20% (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016). El DR112 tiene dos módulos de riego (Figura 12), Ajacuba y Tetepango, que son totalmente regados con agua residual. Por otra parte, a pesar de ser una zona semiárida existen pozos, los cuales facilitan la producción de agricultura de invernadero, que a pesar de ser escasa genera ganancias a productores privados no ejidatarios.

“De manera física parece ser el que recibe agua residual cruda representando un riesgo potencial. El DR112 es una zona de alta marginación, tiene problemas de enfermedades en los productores y se presume que los forrajes ocasionan problemas en los animales, también existe contaminación y salinidad en suelos, así como saturación y contaminación de mantos freáticos” (Jefes de operaciones de los Distritos de Riego, 2016)

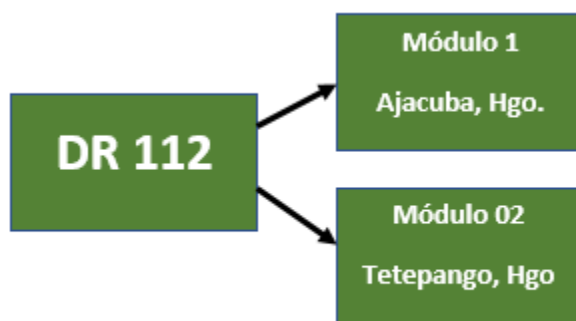


Figura 12. Estructura del Distrito de Riego 112. (CONAGUA, SISTAG-CNA. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas., 2016)

3.1.2.- Caracterización ambiental de los suelos

El suelo del Valle del Mezquital es la zona que mayor impacto ha recibido por el empleo de agua residual sin tratar en agricultura de riego. Los impactos en este pueden ser considerados tanto positivos como negativos. A continuación, se presenta una caracterización del suelo clase Feozem considerando su contenido de nutrientes, materia orgánica, salinidad, microorganismos y metales pesados en la Tabla 16, recordando que existen al menos cinco clases.

Nutrientes, materia orgánica y salinidad

El Valle de Tula cuenta con cinco clases de suelo de acuerdo con la clasificación de la FAO (Murillo T., 2012), de los cuales tres están directamente relacionados con el reúso de agua residual (Tabla 3). Esta relación ha favorecido la economía de la zona gracias a la formación de suelos que, no sería posible sin el aporte de los nutrientes y materia orgánica contenidos en el agua residual sin tratar por un periodo de 97 años (Siebe G. C. , Conferencia Magistral. Implicaciones ambientales del reúso de agua residual para riego por más de un siglo en el Valle del Mezquital). El agua residual ha aportado incidentalmente materia orgánica y nutrientes, los cuales han propiciado por sus características y aptitudes para la productividad agrícola.

Los feozems están ampliamente distribuidos en el Valle del Mezquital (35%) y presentan un relieve semiplano, siendo en general de uso agrícola, por esta razón fueron tomados como referencia para analizar las características del suelo en esta zona. En la Tabla 16 se muestran los parámetros para caracterizar el suelo, los valores promedio en los feozems del Valle del Mezquital y el valor de referencia para el mismo tipo de suelo en otras zonas. Se puede observar que en cuanto a nutrientes los feozems del Valle tienen 2.4 veces más fósforo que los mismos tipos de suelo en otra zona. Lo mismo ocurre con el nitrógeno y la materia orgánica, los cuales son 4.3 y 8.14 veces respectivamente, más elevados que en el valor de referencia (Tabla 16). Las características de los suelos en cuanto a nutrientes y materia orgánica se acrecientan con los aportes de estos nutrientes que se encuentran también en el agua residual, lo cual es benéfico para la agricultura y economía del Valle.

Tabla 16. Caracterización del suelo tipo Feozem en el Valle del Mezquital

Grupo	Parámetro	Valor promedio	Valores de referencia
Nutrientes	Fósforo (ppm)	73	30
	% de nitrógeno	0.3	0.069
Materia orgánica	% de materia orgánica	5.7	0.7
Salinidad ^(a)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^3$)	104000	4600
	pH (1:2.5 en agua)	7.7	6.7
Microorganismos ^(b)	Coliformes fecales (NMP/g)	4.1	<6.3
	Huevos de Helminto (HH/g)	0.6	<35
Metales pesados ^(b)	Cadmio	1.05	39
	Cromo	31.4	3000
	Cobre	20	1500
	Plomo	27	840
	Níquel	19	300
	Zinc	126	2800

Elaborado con base en Chávez et al., (2012). An evaluation of the changing wastewater irrigation regime for the production of alfalfa (*Medicago sativa*). Rev. Agricultural Water Management no. 112, pp. 76-84; NOM-004-SEMARNAT-2002. (a) El parámetro conductividad eléctrica fue considerado para medir la salinidad, el pH es un referente para la caracterización general del suelo. (b) Los valores de referencia utilizados para microorganismos y metales pesados fueron tomados de la NOM-004-SEMARNAT-2002, ya que se puede considerar al suelo del Valle del Mezquital como un biosólido clase C. Los valores de referencia para metales pesados fueron considerados con base en suelos excelentes, ya que la normatividad es más rigurosa.

A la par de los nutrientes y materia orgánica, la salinidad es otro parámetro que debe considerarse de importancia en el Valle del Mezquital. El suelo del Valle tiene una conductividad eléctrica de $104,000 \mu\text{S}/\text{cm}^3$, lo cual corresponde a un suelo sódico pues es menos a $400,000 \mu\text{S}/\text{cm}^3$ (Intagri, 2017). Por lo anterior se requiere de un mayor lavado de sales con agua de riego extra. Al lavarse las sales, estas se infiltran en el suelo y se espera que puedan llegar a una profundidad que no interfiera con las propiedades de este para su desempeño en la agricultura (Ibidem, 2017). El pH de la zona del Mezquital es alcalino comparado con el de referencia, que es ácido al ser de 6.7, por lo cual se encuentra en una escala distinta.

Microorganismos y metales pesados

El suelo es primordial en el Tratamiento suelo-acuífero (SAT), ya que por medio de la adsorción se retienen algunos contaminantes en el suelo y otros más logran infiltrarse. En el caso de los microorganismos analizados en esta investigación, tanto los coliformes fecales como los huevos de helminto no rebasan los límites de la NOM-004-SEMARNAT-2002. Los microorganismos se comparan con esta norma porque el suelo del Valle tras recibir agua residual sin tratar por 97 años, puede considerarse como un biosólido, lodo clase C. Los coliformes fecales son retenidos en el suelo en un 99% y logran eliminarse hasta dos unidades logarítmicas de estos. La retención de coliformes fecales en suelo dependerá de la concentración de estos en el agua residual, las cuales llegan hasta las 7 unidades logarítmicas. En cuanto a la remoción de huevos de helminto se logra hasta un 97% a través del suelo, al igual que los coliformes fecales, este logra retenerlos (Landa-Cansigno, 2009).

En cuanto a los metales pesados, se han realizado muestreos en puntos de la zona del Valle relacionados con los tres distritos de riego (IINGEN, 2008). Se han estudiado metales pesados como el cadmio, cromo, cobre, plomo, níquel y zinc los cuales al igual que los microorganismos, han sido comparados con los LMP establecidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002 no rebasan estos límites (Tabla 16). Se refiere que hay un incremento de cadmio, cobre, plomo y zinc tras 97 años de riego. Aunque no rebasan los LMP, cultivos como el trigo y la alfalfa absorben cadmio y plomo (Siebe G. & W.R., 1996) (Vázquez-Alarcón, 2001), lo cual en el mediano y largo plazo deberá estudiarse por el posible impacto en el ganado y en la salud de la población. Ante esto, sería importante modificar las normativas nacionales en materia de biosólidos para que los límites sean más restrictivos.

3.1.3.- Productividad de los DR003, DR100 y DR112

Dentro de los Distritos de riego del Valle del Mezquital el DR003 cosecha 54,812 hectáreas, el DR100 29,384 hectáreas y el DR112 cosecha 6580 hectáreas. También, el DR003 tiene 34,499 usuarios, un número superior a los Distritos de Riego DR100 Y DR112, los cuales tienen 16,798 y 1551 usuarios respectivamente. El DR003 produce 2734 miles de

toneladas, mientras el DR100 produce 650 miles de toneladas y el DR112, 118 miles de toneladas. El DR003 es también el que obtiene mayores ganancias, pues obtiene 1105 millones de pesos en promedio al año, mientras el DR100 obtiene 812 millones de pesos y el DR112 solo obtiene 82 millones de pesos. El valor total de la producción es de 2000 millones de pesos al año. Aunque, en cuanto a Precios Medios Rurales (PMR) el que tiene mayores precios de mercado es el DR100, pues en promedio los cultivos tienen un precio de \$1247 por tonelada, comparado con el DR003 que tiene \$404 por tonelada (Ver Tabla 17).

Se podría deducir que las asimetrías en cuanto a productividad son a consecuencia de la superficie cosechada, ya que el DR003 es el más extenso. Aunque existen otros factores como la calidad del agua con la que se siembra en el Valle del Mezquital, ya que el DR100 es el que riega con agua residual diluida y por ende existe la posibilidad de que contenga una menor cantidad de patógenos y menor concentración de nutrientes, pero esto no se mide. De acuerdo con lo anterior se podría justificar que los PMR sean más elevados en el DR100 ya que en este distrito de riego se siembran verduras y legumbres que se consumen crudas que además tienen un alto valor agregado en el mercado. En los DR003 y DR112 se tiene prohibido sembrar este tipo de cultivos porque reciben agua residual sin tratar y por ende se siembran maíz y forrajes como la alfalfa, cebada y avena que no son altamente redituables en el mercado (CONAGUA, Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego 2013-2014, 2016).

Tabla 17. Variables relacionadas con la productividad de los Distritos de Riego en el Valle del Mezquital

Variables (promedio 1997-2014)	DR003	DR100	DR112
<i>Usuarios</i>	34,499	16,798	1,551
<i>Producción (miles de toneladas)</i>	2,734	650	118
<i>Precios medios rurales (\$/Ton)</i>	404	1247	696
<i>Ganancias (miles de \$)</i>	1,105, 275	812,287	82,338

En el Valle del Mezquital, los tres Distritos de Riego producen ocho cultivos principales los cuales son alfalfa, maíz, cebada forrajera, frijol, calabacita, chile verde y

avena forrajera verde. De los ocho cultivos principales se producen 39,911 miles de toneladas de alfalfa, 29,126 toneladas de maíz y 4126 toneladas de avena forrajera verde, razones por las cuales el Valle del Mezquital es a nivel nacional el primer productor de forrajes (Figura 13). Aunque como ya se ha mencionado, los forrajes no tienen un alto valor agregado en el mercado y la zona podría ser más productiva si se incorporara la siembra de frijol, chile verde y calabacita los cuales tienen PMR que oscilan entre los \$3515/Ton y \$14,716/Ton (Figura 14).

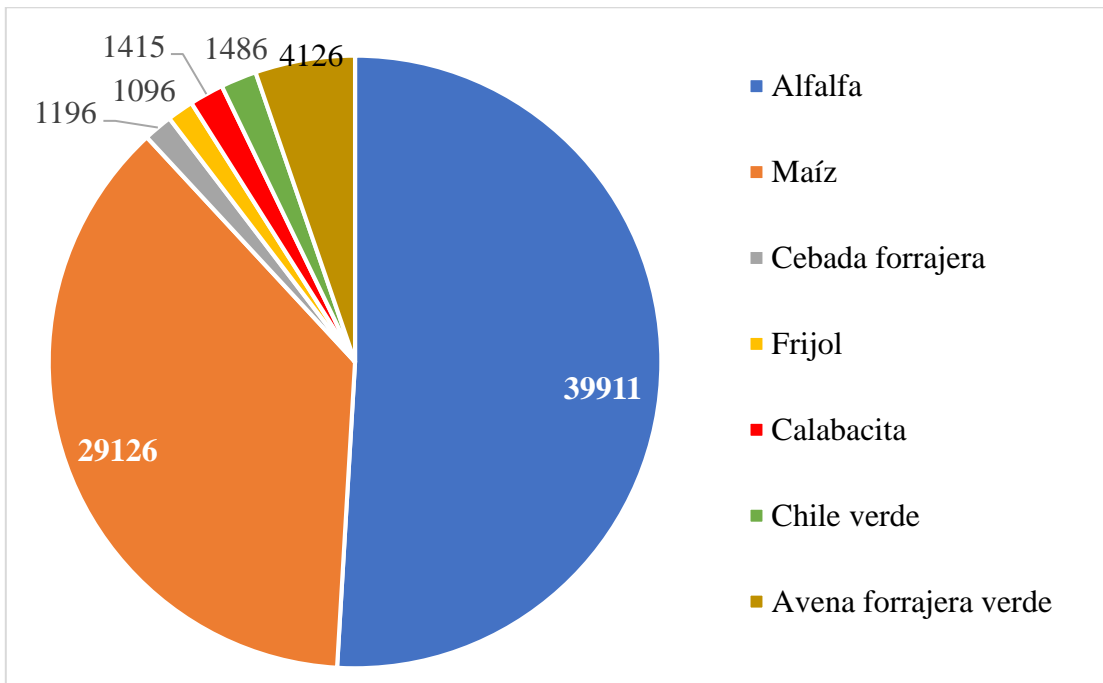


Figura 13. Principales cultivos del Valle de Mezquital (Miles de Ton/Año) (2014). Elaboración propia con datos de CONAGUA.

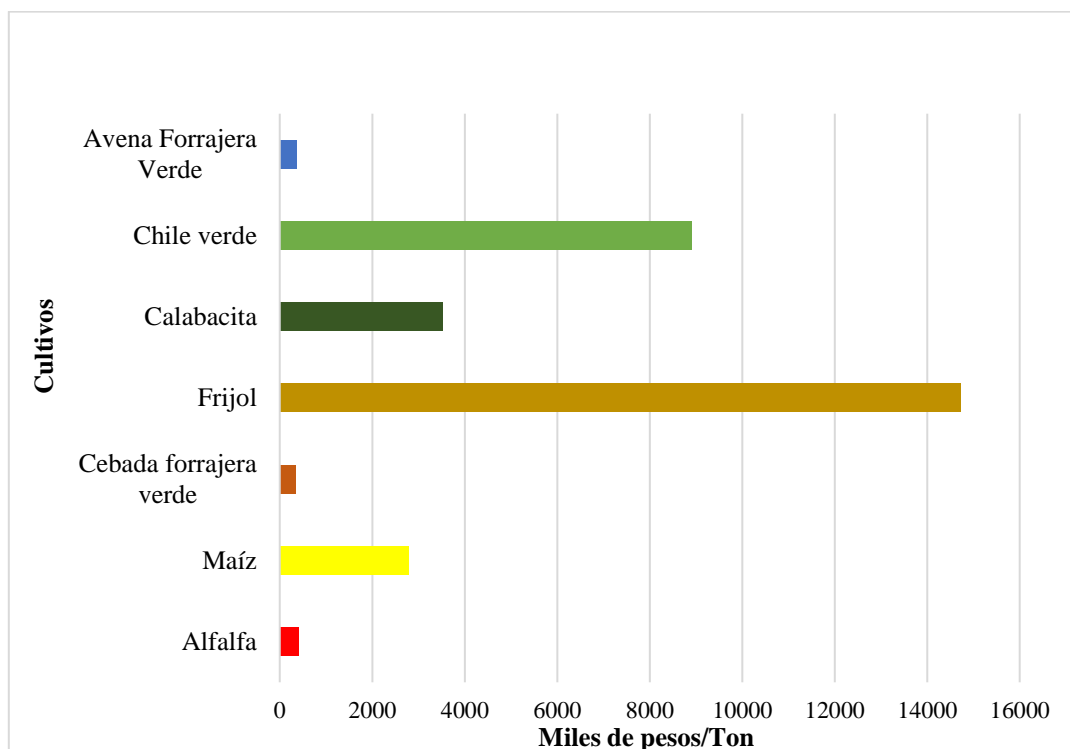


Figura 14. Precios medios rurales (PMR) de los principales cultivos del Valle de Mezquital 1997-2014 (2017). Elaboración propia con datos de CONAGUA.

3.1.4.- Identificación de amenazas sanitarias para la salud pública del Valle del Mezquital

Las amenazas sanitarias podrían definirse como los peligros naturales o antropogénicos que afectan adversamente las condiciones de salud pública en un determinado lugar. En el Valle del Mezquital se puede inferir que existen amenazas a la salud pública¹⁹ por el empleo de agua residual sin tratar en riego agrícola. Lo anterior, podría deberse al periodo de 97 años que lleva esta práctica, lo cual posiblemente ha generado un cierto grado de exposición²⁰ en la población.

¹⁹ Se define como el arte y ciencia de prevenir enfermedades, promover la salud y prolongar la vida mediante los esfuerzos organizados de la sociedad.

²⁰ La exposición puede definirse como la probabilidad de que alguna situación ocasione cambios adversos al estar en contacto con una amenaza o peligro.

De acuerdo con el Sistema Integral de Información del Estado de Hidalgo (SIIEH), se presentan 27,806 casos de enfermedades entéricas al año en el Valle del Mezquital. La mortalidad por enfermedades crónicas asociadas al consumo e inhalación de metales pesados es de 965 casos al año. La diferencia entre ambos tipos de padecimientos puede ser que las enfermedades asociadas a metales pesados son mucho menos frecuentes (número de casos), pero en el mediano y largo plazo son más costosas que las enfermedades entéricas. Las enfermedades entéricas son recurrentes, generalmente agudas (Cifuentes, 1994) y mucho menos costosas tanto para el Sector Salud como para las familias (INEGI, Cuenta satélite del sector salud en México, 2017).

Un ejemplo de estas enfermedades crónicas es la Insuficiencia Renal Crónica, la cual en el Valle del Mezquital podría deberse a la exposición potencial de la población a contaminantes presentes en el agua residual sin tratar como el cromo y el cadmio; dicha enfermedad tiene un costo promedio de \$250,000 anuales por paciente para el sector salud en todo el país (Cámara de Diputados, 2017) . Se determinó que esta enfermedad representa el 10.4% del gasto promedio anual en Salud para la zona del Valle del Mezquital, un porcentaje considerable al tratarse de una enfermedad (INEGI, Cuenta satélite del sector salud en México, 2017). Con el tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital se podría disminuir el riesgo de enfermedades entéricas en el corto plazo. Además, se podrían reducir los altos costos que se pueden generar por el padecimiento de insuficiencia renal, siempre y cuando estos padecimientos se deban a la exposición potencial al agua residual sin tratar.

3.2.- Índices de calidad para el agua residual sin tratar

En este apartado se presentan los resultados el índice de calidad del agua (sin tratamiento, tratada y del acuífero) de acuerdo al grupo de interés.

3.2.1.- *Microorganismos*

Coliformes fecales

Los coliformes fecales son un parámetro de mala calidad del agua por contaminación fecal en el Valle del Mezquital se han encontrado concentraciones mayores a 6 unidades logarítmicas por mL, por lo cual tienen una alta relevancia para el presente estudio. Están compuestos regularmente por *Escherichia coli* (*E. coli*), una enterobacteria que causa diarrea, infecciones en el tracto genitourinario, meningitis, hemorragias intestinales, falla renal e incluso la muerte (OMS, 2008). La Figura 15 muestra el índice de coliformes fecales en agua residual sin tratar se encuentra en mayor cantidad en estiaje que en temporada de lluvias, el índice máximo en estiaje es de 2.5 y en temporada de lluvia 2.28, lo cual es atribuido a que en esta temporada hay arrastres por un mayor flujo de agua.

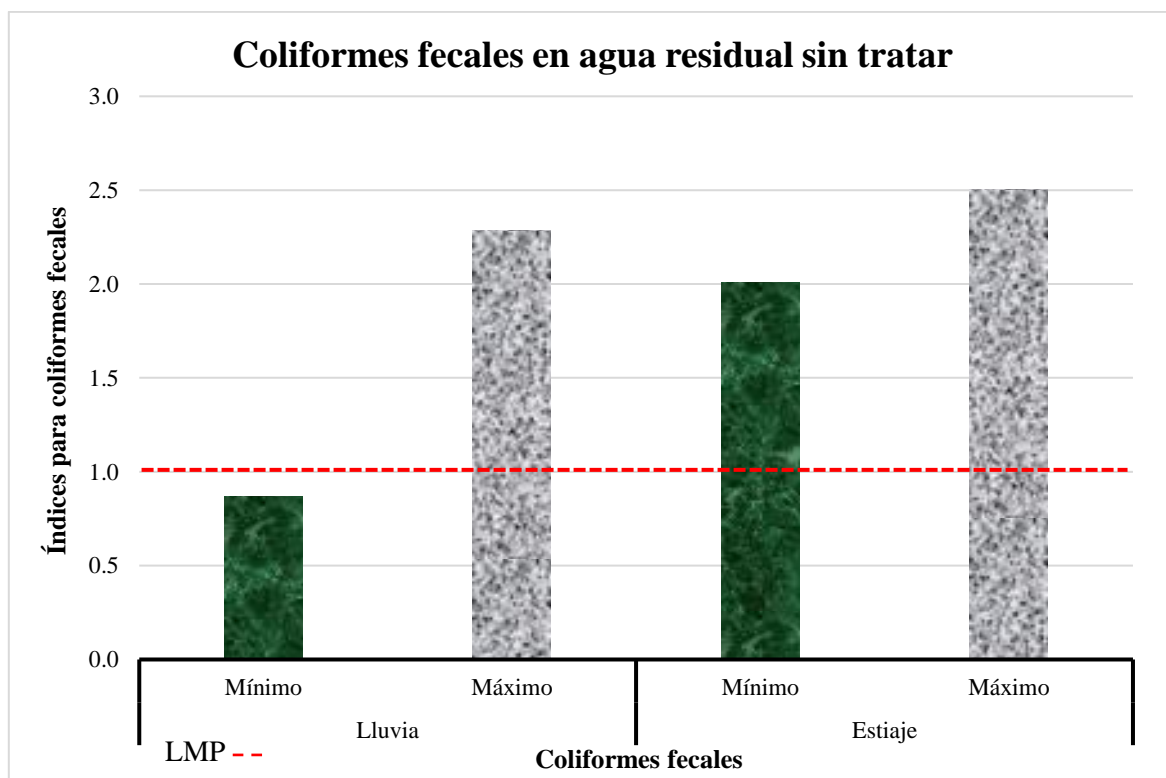


Figura 15. Índices de coliformes fecales en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

Huevos de Helminto

La Figura 16 muestra el índice para el parámetro de los Huevos de Helminto (HH). El índice máximo en estiaje es de 21.9, mientras que en temporada de lluvia es de 20.27, por lo cual este parámetro se encuentra muy por encima de los LMP, ya que incluso la OMS recomienda que este límite sea menor a 1 HH/L. Con base en lo anterior, se puede observar que la mayor contaminación por HH en el agua residual sin tratar es en temporada de estiaje y se encuentra en un 2190% por encima de los LMP y representa una amenaza potencial tanto para los agricultores como para la población aledaña, especialmente niños que están expuestos al agua de riego (OMS, 2008).

En el Valle del Mezquital se ha reportado que el género más importante de los HH es *Ascaris lumbricoides*, parásito que provoca Ascariasis, enfermedad que ocasiona diarrea y obstrucción intestinal hasta problemas de neumonía (Ibidem, 2008). Los más vulnerables en la zona del Valle del Mezquital son los agricultores, regadores y niños (Cifuentes et al., 1994).

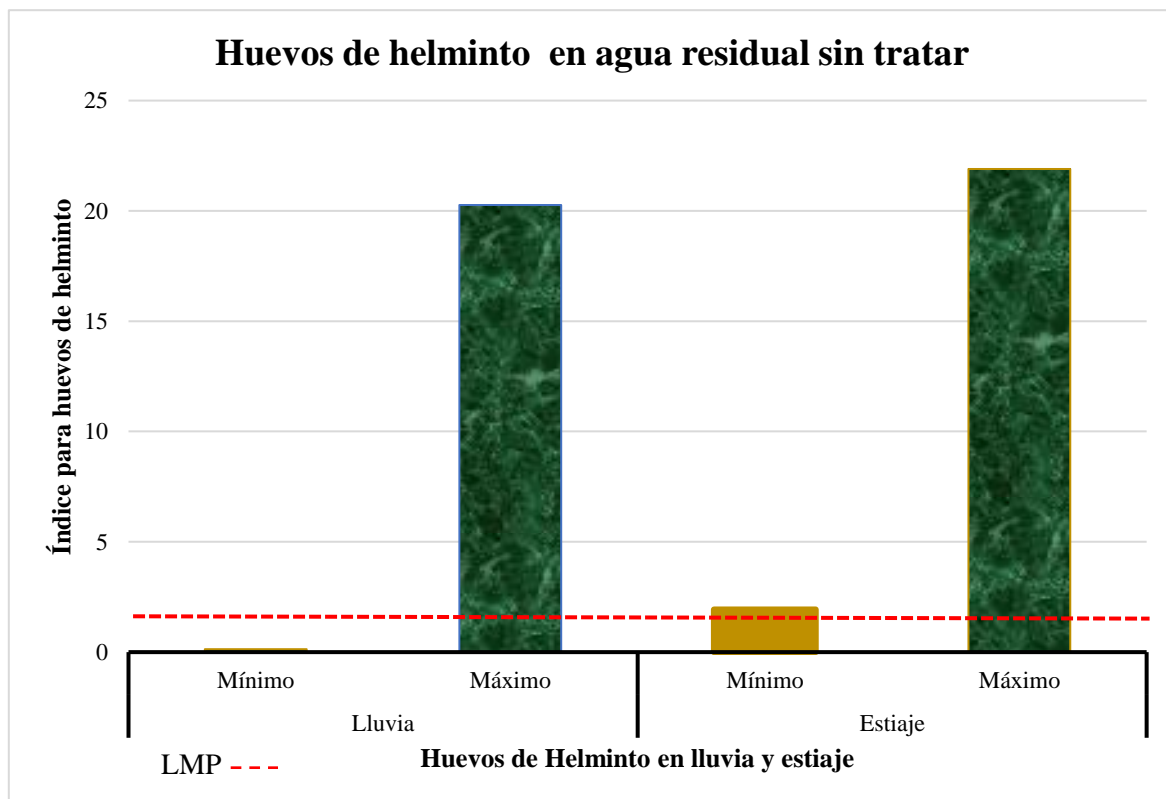


Figura 16. Índices de Huevos de Helminto en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

3.2.2 - Metales pesados

La Figura 17 contiene los índices para metales pesados en ambos periodos. Se puede observar que en temporada de lluvia los metales que exceden los LMP son el aluminio (2.71), hierro (1.83) y manganeso (1.79). El aluminio (Al) y el hierro (Fe) se encuentran de manera natural en la corteza terrestre. El manganeso (Mn) está asociado a la presencia de hierro en el agua, este metal se encuentra de forma natural en la naturaleza y algunos compuestos de este se utilizan para la elaboración de gasolinas y algunas aleaciones de hierro y acero (OMS, 2008).

Mientras que para la época de estiaje el boro excede los LMP, con un índice de 2.20. El boro se encuentra en algunas plantas comestibles y también algunos compuestos de este metal se utilizan en la fabricación de jabones, detergentes y vidrio. El Cianuro excede los LMP en la temporada de estiaje con un índice de 3.8 y esto representa un riesgo potencial, ya que es un metal pesado altamente tóxico que puede ocasionar enfermedades como el cáncer.

Los riesgos para la salud que el aluminio, boro y manganeso son diversos, la exposición a aluminio puede ocasionar Alzheimer. El manganeso es vital para el ser humano, aunque se ha dado a conocer que una sobreexposición puede producir efectos neurológicos (OMS, 2008). Algunas pruebas realizadas en animales arrojan que el boro produce anomalías en el aparato reproductor masculino en estos, aunque no se asocian efectos toxicológicos en seres humanos. Finalmente, el contacto de la piel con el cianuro puede producir irritación, llagas y daño renal (Ibidem, 2008). Cabe aclarar que ello dependerá de la concentración y el tiempo de exposición a este metal pesado.

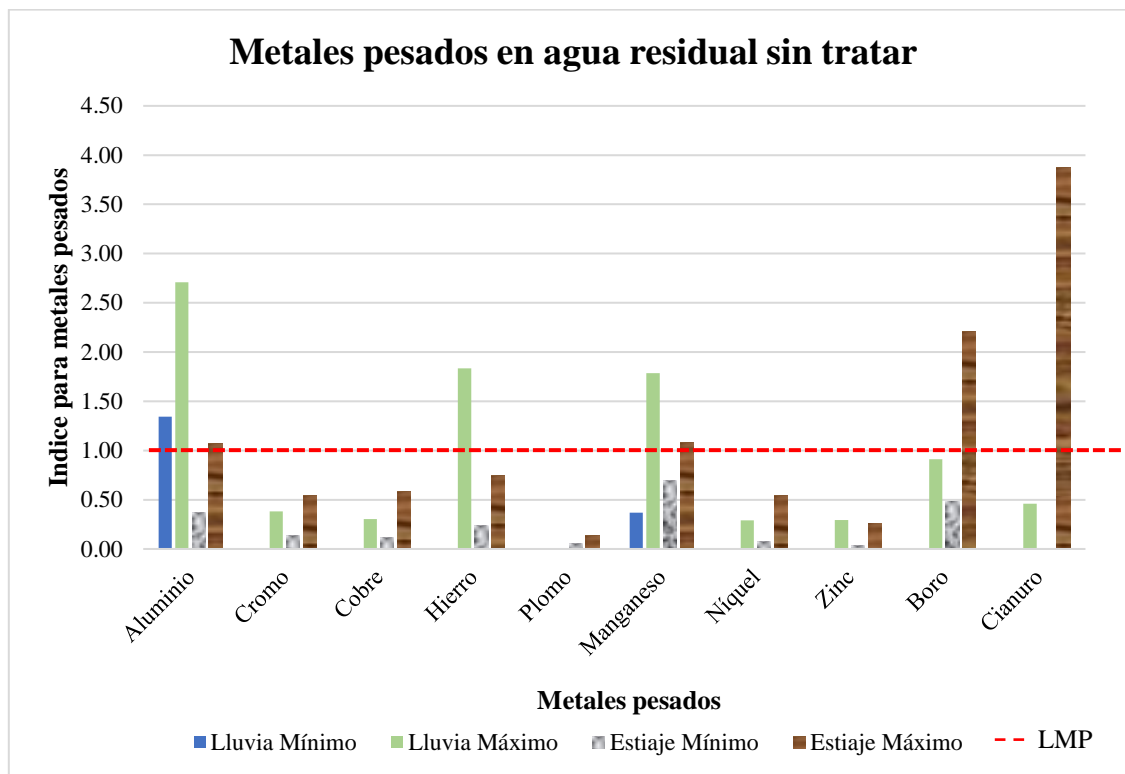


Figura 17. Índices de metales pesados en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

3.2.3.- Materia orgánica

En la Figura 18 se puede observar que parámetros como el Carbono Orgánico Total (COT) es mayor en temporada de lluvia, este fenómeno se da por el efecto de arrastre de materia orgánica que se da a consecuencia de este fenómeno natural. El índice máximo del COT en lluvia es de 28.75 también muy por encima de los LMP, lo cual expresa que el agua residual es muy rica en materia orgánica en descomposición ya que este tipo de carbono funciona como alimento para los microorganismos, acelerando su reproducción (Jiménez Cisneros & Chávez M., 2011).

Dos parámetros relacionados con el COT, son la DBO₅ y la DQO, las cuales son parámetros que miden también la cantidad y descomposición de materia orgánica, en todos estos parámetros su presencia fue mayor en temporada de estiaje. La DBO₅ mide la oxidación biológica de sustancias orgánicas presentes en el agua y se determinó un índice máximo de 3.8. Por su parte, la DQO mide también la oxidación de sustancias orgánicas, aunque de

manera química y puede verse interferida por sustancias inorgánicas como sulfitos y tiene un índice máximo de 1.37. Finalmente, SST representan un índice de 80.8, estos sólidos suspendidos pueden ser partículas de sustancias orgánicas e inorgánicas.

Se puede observar que los parámetros de materia orgánica exceden en demasía a los LMP, lo cual se traduce en una muy mala calidad del agua residual sin tratar. Sin embargo, estos parámetros contenidos en exceso en este tipo de recurso hídrico son de vital importancia para los suelos y la agricultura del Valle del Mezquital. El uso de agua residual sin tratar en la agricultura incrementa el contenido de materia orgánica y nutrientes en los suelos cultivados, esto contribuye a mantener y mejorar la fertilidad de los mismos. La modificación del suelo del Valle del Mezquital se ha llevado a cabo por 97 años, por lo cual se ha mejorado la acumulación y estabilidad de materia orgánica en esta zona (Jiménez C. B. E., 2004).

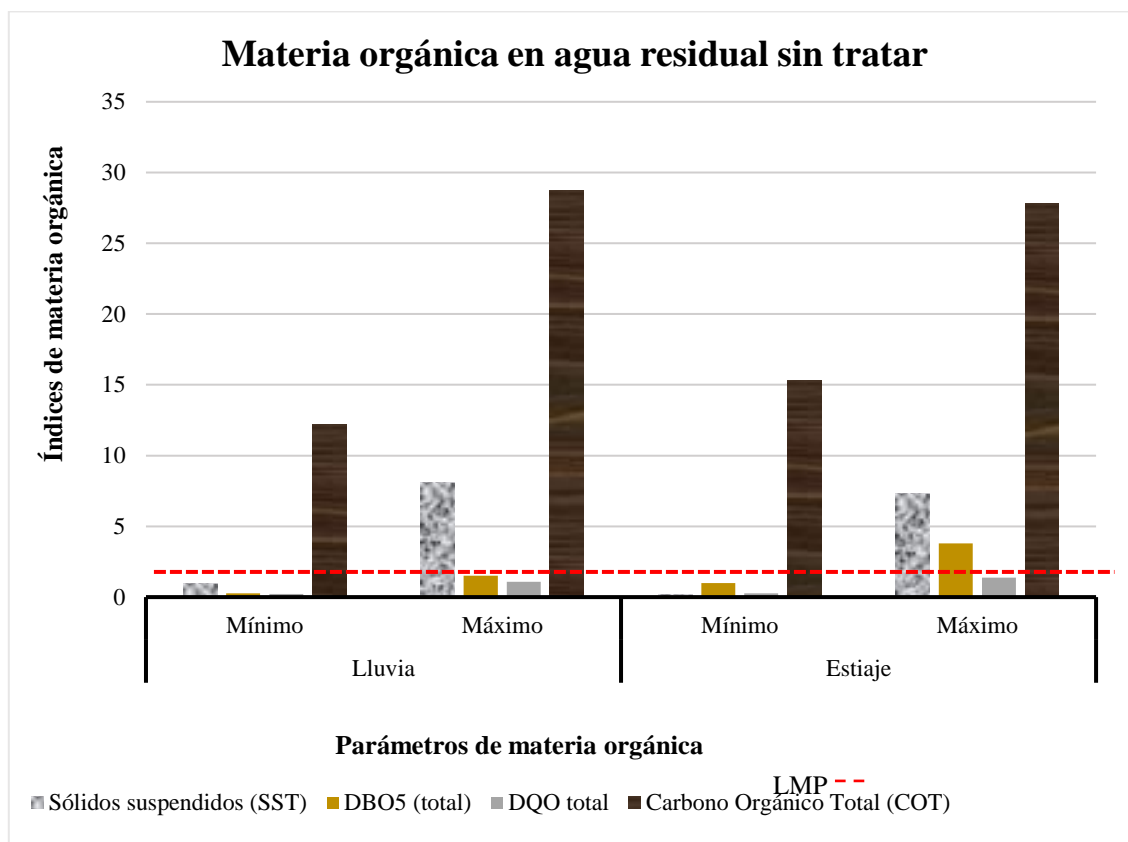


Figura 18. Índices de materia orgánica en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

3.2.4.- Nutrientes

El nitrógeno es uno de los nutrientes necesarios para la agricultura ya que es uno de los principales componentes de los fertilizantes. De manera natural este se puede encontrar ya sea en forma de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos. El nitrógeno amoniacal está compuesto por amoniaco (NH_3) y amonio (NH_4), donde el amonio es absorbido por las plantas y es útil como nutriente. Los nitritos (NO_2) son iones menos estables que los nitratos, pueden actuar como agentes oxidantes, lo cual los convierte en nitratos. Los nitratos (NO_3) son los compuestos preferidos por los cultivos para su absorción. Por su parte, el fósforo se puede encontrar en la naturaleza como fosfatos u ortofosfatos. La fuente principal de fosfatos orgánicos son los procesos biológicos, la presencia de estos está asociada a crecimiento de algas indeseables en embalses y lagos y acumulación de sedimentos (CEPIS, Tratamiento de agua para consumo humano. Manual 1: Teoría, 2004). No se han identificado efectos negativos en la salud por fósforo.

Los nutrientes que el agua residual aporta a la agricultura del Valle del Mezquital son de gran importancia. Los parámetros analizados son fósforo y nitrógeno, encontrándose que estos exceden de los LMP en ambas temporadas (Figura 19). el fósforo se encuentra por encima de los LMP en temporada de lluvia con un índice de 2.3, mientras que en temporada de estiaje presenta un índice máximo de 6.8. Por otro lado, el nitrógeno tiene un índice de 1.5 para la primera época y de 1.1 para la segunda (Veáse Figura 19).

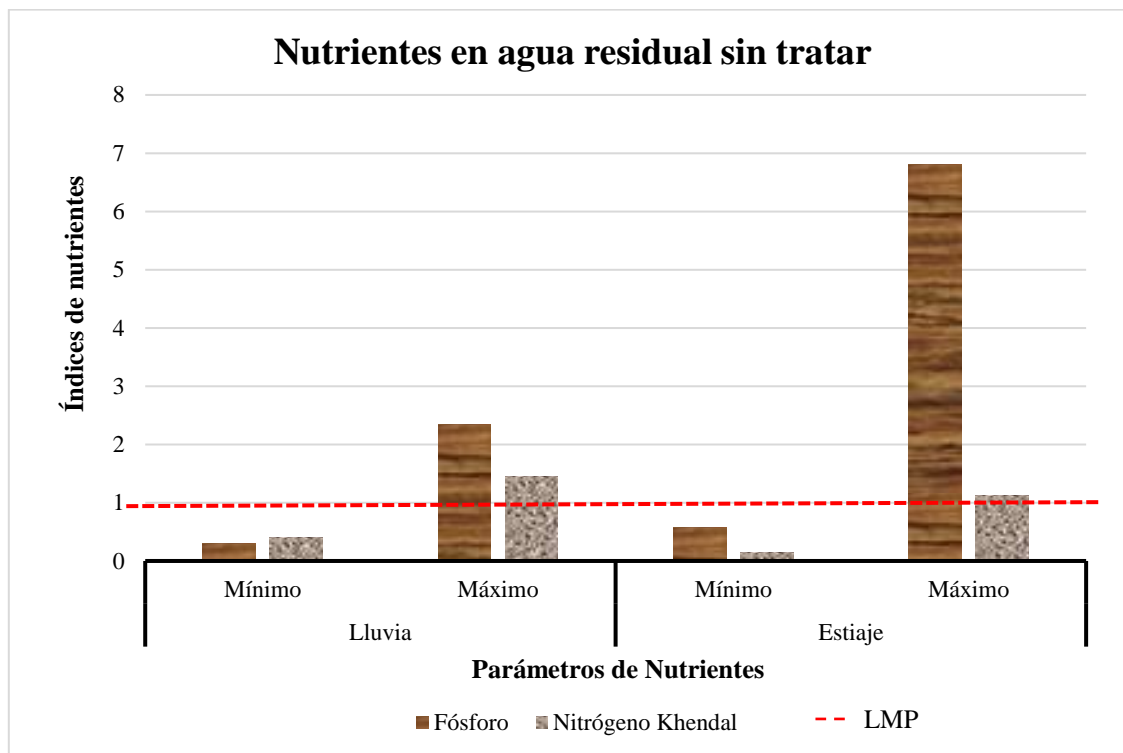


Figura 19. Índices de nutrientes para el agua residual sin tratar: Fósforo y Nitrógeno. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

3.2.5.- Salinidad

Los sulfatos se encuentran de manera natural en minerales, aguas subterráneas y fuentes naturales. En cuanto a los fluoruros, este tipo de sales también se encuentran de manera natural en minerales y fuentes naturales de agua; aunque, también son un componente esencial de los dentífricos. El agua residual que llega al Valle del Mezquital es altamente salina. Los parámetros utilizados para determinar los índices de salinidad fueron sulfatos, fluoruros y Sólidos Disueltos totales (SDT) (Figura 20); así como la conductividad eléctrica (C.E.). Los índices de los primeros tres parámetros exceden los LMP en temporada de estiaje en 9.97 para sulfatos, 1.54 para fluoruros, pero los más elevados son los SDT que alcanzan un índice de 890 en esta temporada.

En temporada de lluvia solo los SDT rebasan los LMP con un índice de 1123. Los SDT están directamente relacionados con la conductividad eléctrica (C.E.), cuyo LMP de en el agua potable en Estados Unidos es de 1500 microsiemens por cm^2 ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$). En el Valle

del Mezquital, la conductividad eléctrica llega a 2362 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ en temporada de lluvia y a 4607 $\mu\text{S}/\text{cm}^3$ en temporada de estiaje. La relación entre salinidad y conductividad eléctrica es mayor en temporada de estiaje y se puede observar en la Figura 19.

Se establece que el agua residual que llega al Valle del Mezquital es altamente salina, ya que el alto contenido de sales en el agua ensalitra los suelos (Santillán A., 2011) y puede provocar una intolerancia por parte de los cultivos y como consecuencia un bajo rendimiento. Esta condición afecta la producción de algunos cultivos como la alfalfa, el maíz, el frijol, la calabacita y la avena (ver Tabla 18). En la Tabla 18 se puede observar que la cebada es el cultivo más tolerante a la salinidad, ya que la conductividad eléctrica en ambas temporadas es mayor de la que pueden soportar cultivos como la alfalfa, maíz, frijol, calabacita y avena. Las sales interfieren también con la asimilación de nutrientes por parte de los cultivos y la actividad microbiana del suelo (FAO., 2017). Los SDT y las sales están estrechamente relacionados con la conductividad eléctrica, ya que la presencia elevada de ambos parámetros, alude una alta salinidad.

Tabla 18. Tolerancia de los cultivos del Valle del Mezquital a la salinidad

Cultivo	Conductividad eléctrica	Tipo de tolerancia
Alfalfa	200,000	Moderadamente sensible
Maíz	170,000	Moderadamente sensible
Cebada	800,000	Tolerante
Frijol	100,000	Sensible
Calabacita	120,000	Moderadamente sensible
Avena	170,000	Moderadamente sensible

Elaboración propia con base en Maas et al. (1977). Crop salt tolerance: Current assessment. Irrig Drain E-ASCE 103: 115-134.

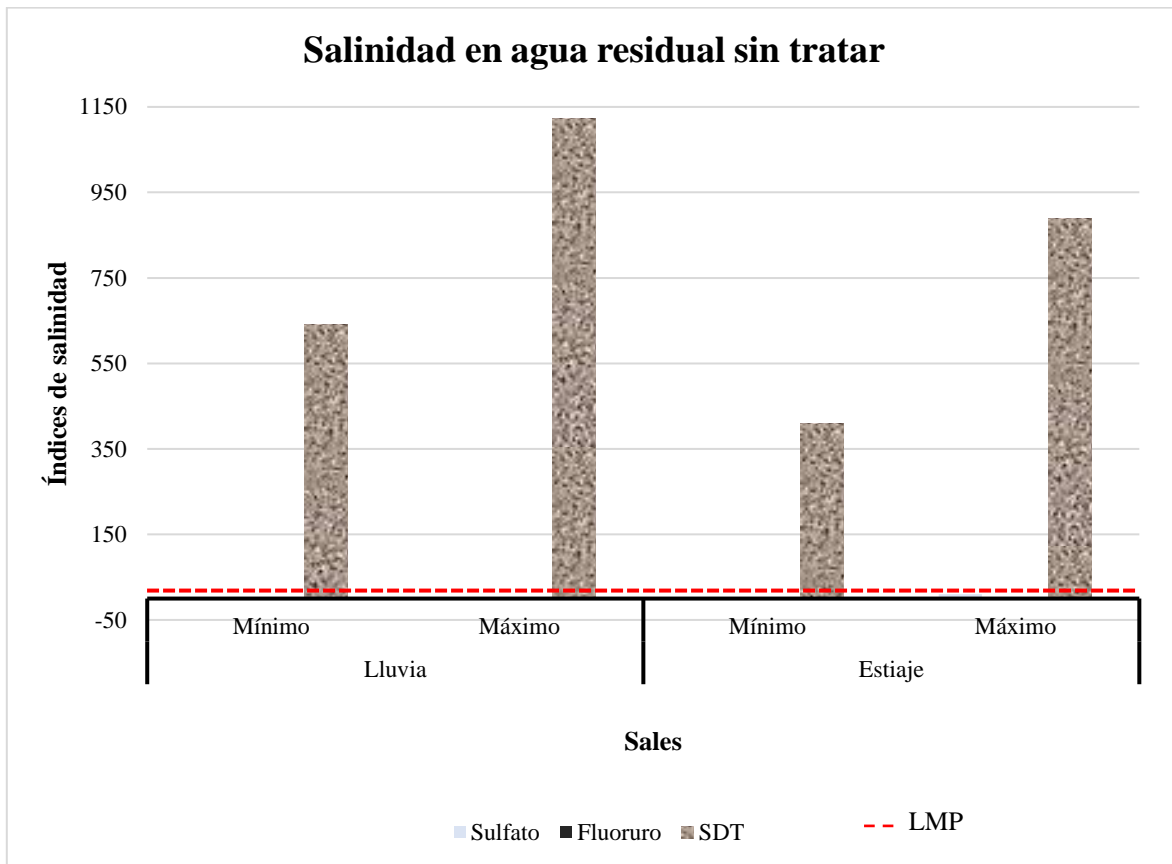


Figura 20. Índices de salinidad en agua residual sin tratar. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

3.3.- Caso de estudio: Costos y beneficios ambientales, económicos y de salud que tendrá el tratamiento del agua residual que tendrá el megaproyecto PTAR Atotonilco.

Se espera que la PTAR al ser el proyecto de tratamiento más grande de América Latina provea de un saneamiento integral a la zona del Valle del Mezquital. El proyecto tuvo un costo de 10 mil millones de pesos y comenzó sus pruebas en el año de 2016 de acuerdo con una entrevista que concedió el director general de CONAGUA al periódico Excélsior (Páramo, 2016). La inversión, los costos de operación y de mantenimiento anuales del proyecto preliminar pueden observarse en la Tabla 19. Se puede observar que 4,942 miles de millones de pesos, que es cerca de la mitad del costo del proyecto fueron destinados para la construcción los dos trenes de tratamiento que este proyecto tendrá.

Tabla 19. Inversión, Costos de Operación y de Mantenimiento de la PTAR Atotonilco, 2008 (Miles de Millones de Pesos)

CONCEPTO	INVERSIÓN M\$	COSTOS DE O&M (M\$/A)
Obras de llegada	264	59
Tren de Procesos Convencionales (TPC)	4,530	363
Tren de Procesos Químicos (TPQ)	412	138
Unidades y Servicios Comunes	487	55
Otros costos	1,666	17
Total	7359	632

Modificado de CONAGUA (2008). Coordinación General de los Proyectos de Agua Potable y Saneamiento del Valle de México. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo.

3.3.1.- Constituyentes que removerán la PTAR Atotonilco (TPC y TPQ)

Materia orgánica

Anualmente, el proceso biológico tratará 725,328,000 m³ de agua residual (entre los meses de enero a mayo). Los SST serán removidos en un 95%, por lo cual habrá un remanente 156.72 kg/ha al año, Adicionalmente en la época de lluvia serán tratados en el proceso TPQ un volumen de 189,216,000 m³ (entre los meses de junio a diciembre) y se removerá el 67% de este parámetro. Por lo anterior, en la temporada de lluvias el efluente proporcionará una mayor concentración de SST que en temporada de estiaje, ya que con el efluente del proceso fisicoquímico aportará 296.7 kg/ha (Figura 21).

En cuanto a DBO₅, al llevarse a cabo el tratamiento biológico considerando que el efluente de este proceso tiene un 10% de remanente se tendrá un aporte al suelo 485 kg/ha al año. En cuanto al tratamiento fisicoquímico, este removerá el 85% de este parámetro, por lo que su remanente es de 75.92 kg/ha. El hecho de que haya mayor concentración de DBO₅ en temporada de estiaje al llevarse a cabo ambos tratamientos, es porque hay 6 veces más de este parámetro en agua residual cruda en temporada de estiaje que en temporada de lluvia (Figura 21).

Con el balance de masas se puede observar que en temporada de estiaje se podrá aprovechar mejor la DBO₅ y en temporada de lluvia los SST. Como se ha mencionado anteriormente, los suelos feozems del Valle del Mezquital contienen 8 veces más materia orgánica que la misma clase de suelo de otras zonas del país, por lo cual será necesario evaluar en el mediano y largo plazo, si existirá una pérdida de materia orgánica en el suelo como consecuencia de la reducción de MO que tendrá el agua residual tratada. Cabe aclarar que la materia orgánica es necesaria en el Valle del Mezquital, ya que libera nutrientes del suelo y es auxiliar en el desarrollo de los cultivos, pero no en exceso.

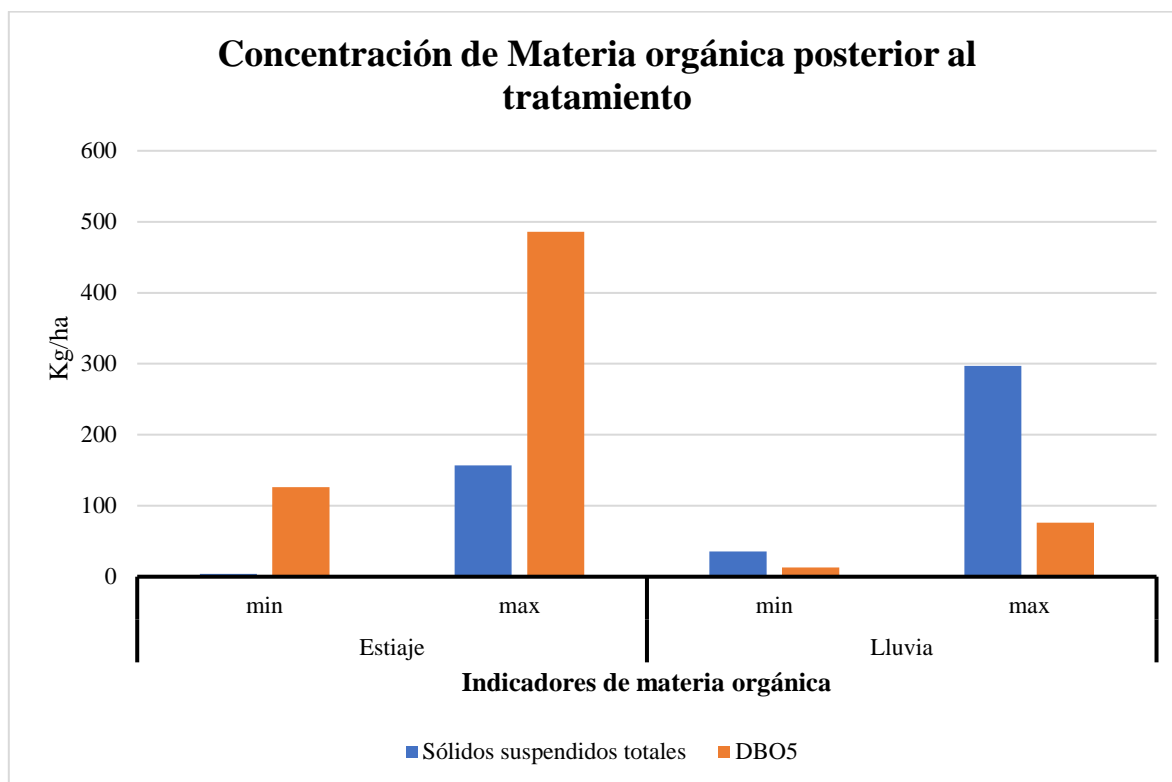


Figura 21. Aportación de materia orgánica en ambas temporadas (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

Nutrientes

En temporada de estiaje y lluvia el TPC removerá el 90% de los nutrientes nitrógeno y fósforo por lo que su aportación a la zona agrícola será de 116 kg/ha al año de nitrógeno, mientras que en temporada de lluvia habrá una concentración de 93.43 kg/ha al año, ya que el TPQ remueve el 10.7% de este constituyente (Figura 22). En cuanto al fósforo, en estiaje habrán 38.42 kg/ha al año y en lluvia 98.15 kg/ha, considerando que el proceso TPQ tiene una remoción del 24.3% (Figura 22).

Por ende, se puede establecer que ambos procesos removerán los nutrientes y que el porcentaje de remoción será mayor en temporada de estiaje y que la concentración residual será dependiente del contenido de nutriente del agua residual encontrando una mayor concentración en la temporada de estiaje para el nitrógeno y en lluvia para el fósforo. Ambos nutrientes son esenciales para los cultivos del Valle del Mezquital, ya que favorecen el crecimiento vegetativo, la coloración verde y la fijación de otros nutrientes como el potasio (International Plant Institute (IPNI), 2017).

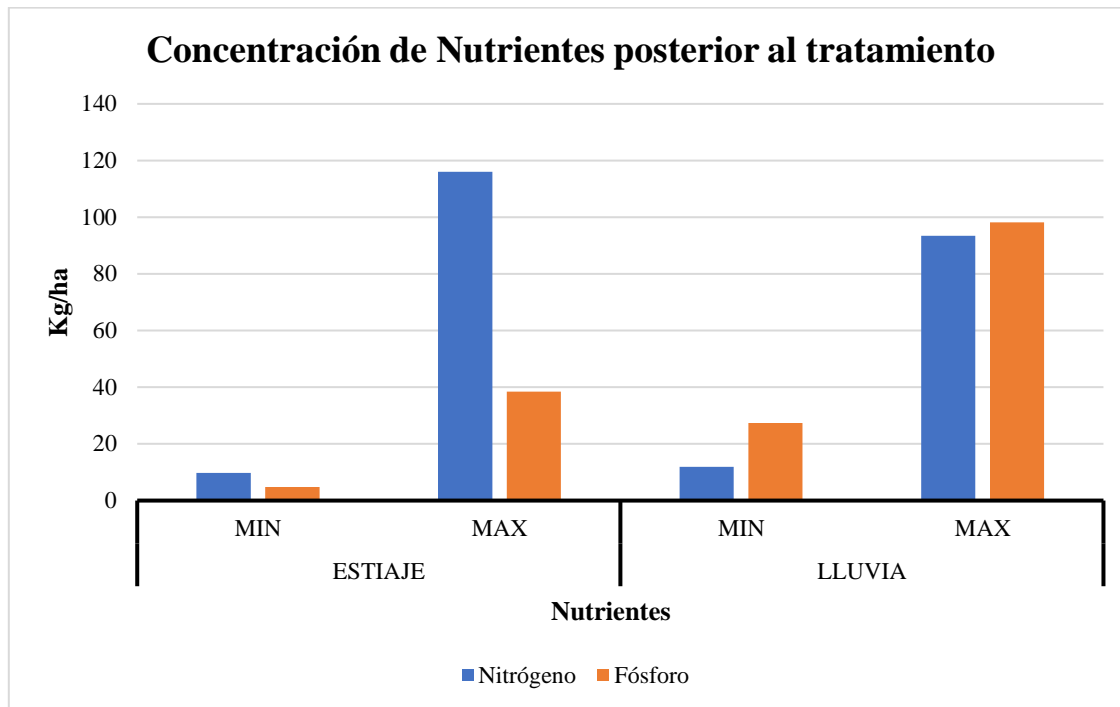


Figura 22. Aportación de nutrientes en ambas temporadas (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

Microorganismos

Coliformes fecales.

Para los coliformes fecales no se pudo realizar un balance de masa, dado que las unidades en que ese expresan son UFC/100 mL, las cuales no se incrementan en el flujo de agua residual sin tratar exponencialmente. Sin embargo, el porcentaje de remoción con el tratamiento biológico posterior a la desinfección en estiaje será de 99.9%, por lo cual se eliminarán dentro del flujo de 23 m³/s la mayor cantidad de estos. De una concentración máxima de 7.5 unidades logarítmicas, se obtendrá un remanente de 0.008 unidades logarítmicas. En temporada de lluvia las concentraciones de coliformes fecales son menores que en temporada de estiaje, atribuida al fenómeno de dilución. Se puede observar que el máximo en esta temporada es 6.85 UFC/100 mL y que se alcanza una remoción similar a la que se logra en el tratamiento biológico de 99.9%, dando como resultado 0.06 unidades logarítmicas. En este sentido, se eliminarán la mayor cantidad de este parámetro en temporada de lluvia también (Figura 23). La eliminación de coliformes fecales reducirá el riesgo de padecer enfermedades entéricas por E. coli.

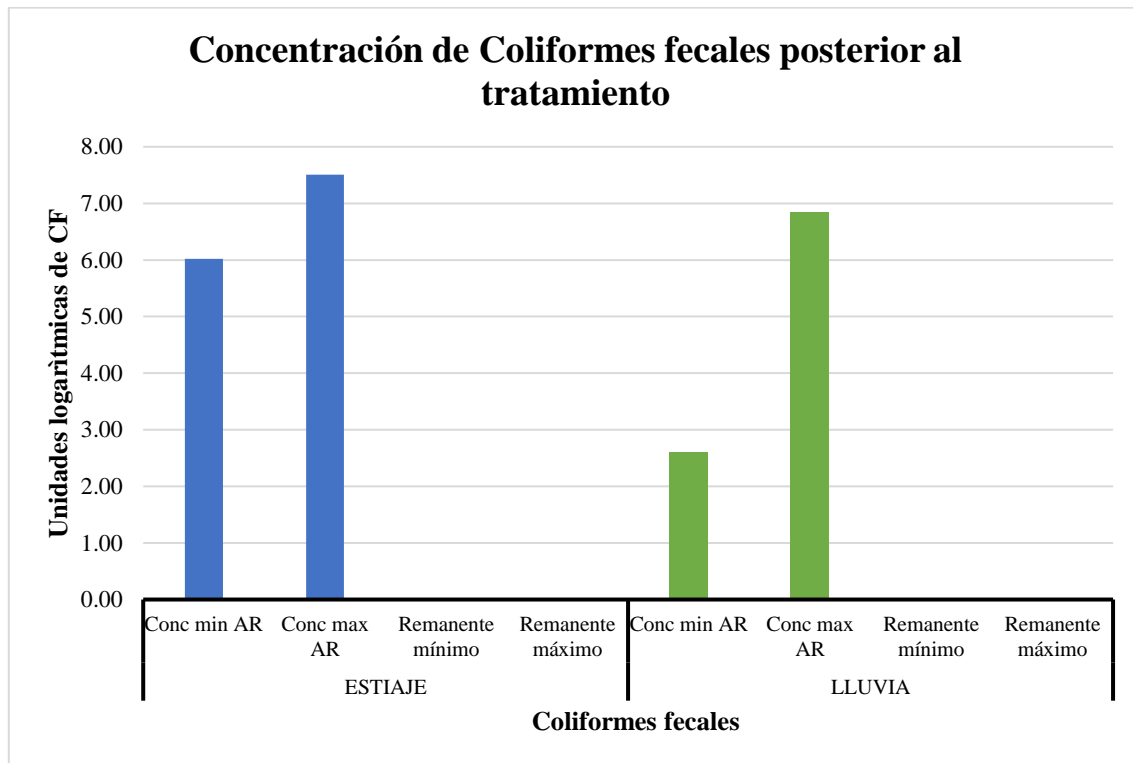


Figura 23. Contenido de coliformes fecales posterior al tratamiento en temporada de lluvia y estiaje (Unidades logarítmicas). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

Huevos de helminto

Los huevos de helminto se removerán en un 99.9% en el tratamiento biológico y en el tratamiento fisicoquímico. En temporada de estiaje hay una mayor concentración de estos microorganismos que en temporada de lluvia. Por ende, en el efluente del TPC habrá una concentración de 0.18 HH/ha al año, mientras que en el efluente del TPQ habrá una concentración de 0.04 HH/ha al año (Figura 24). La remoción de estos microorganismos reducirá que los ahora usuarios de agua residual tratada tengan un menor riesgo de contraer enfermedades entéricas como *Ascariasis*, la cual es muy común en esta zona por el contacto que se ha tenido con el agua residual sin tratar.

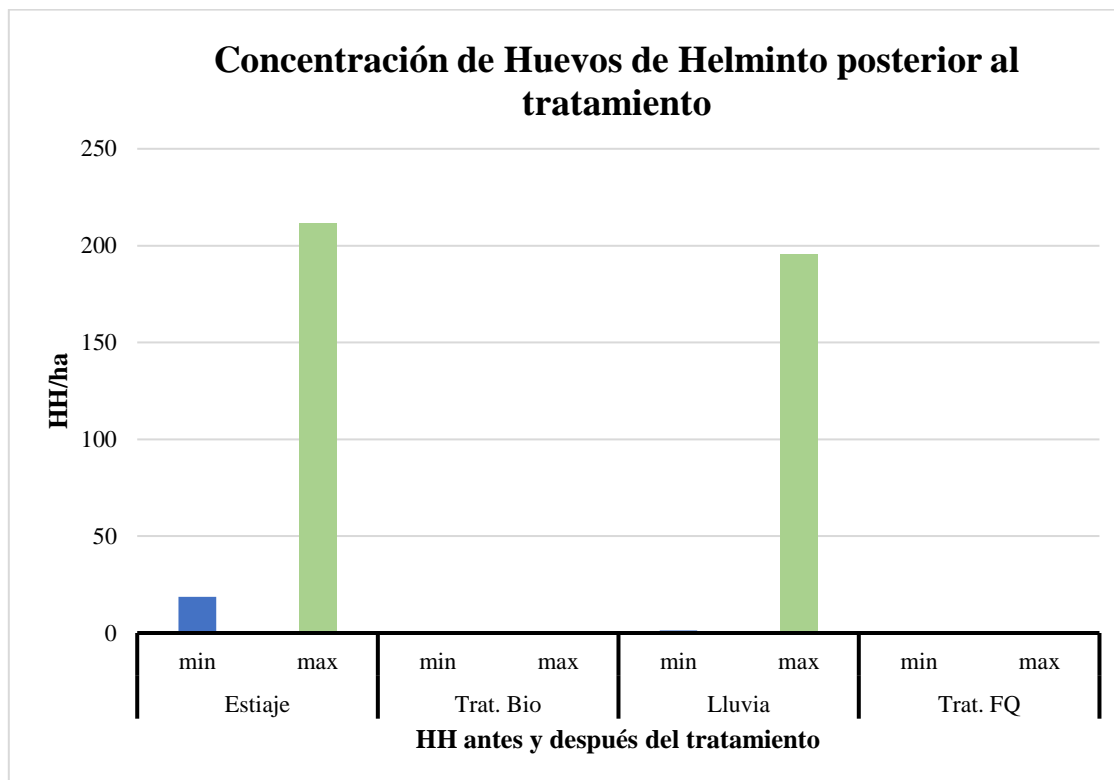


Figura 24. Carga de huevos de helminto en ambas temporadas posterior al tratamiento (HH/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

Metales pesados

En el agua residual cruda hay un mayor contenido de metales pesados en temporada de estiaje que en temporada de lluvia. Para la primera temporada, la remoción para la mayoría de los metales pesados es del 50% para el tratamiento biológico, aunque el cianuro reporta ser removido en un 96.8% por esta tecnología. En cuanto al tratamiento fisicoquímico los metales pesados se remueven en un intervalo porcentual de 83% a 96%, por lo cual la remoción que se lleva a cabo por medio del TPQ es mayor que la del TPC.

Anualmente el efluente del TPC aportará 9.04 kg/ha de boro, 3.19 kg/ha de hierro, 4.5 kg/ha de aluminio, 2.3 kg/ha de níquel, 1.1 kg/ha de zinc, 0.93 kg/ha de manganeso, 0.59 kg/ha de plomo, 0.50 kg/ha de cobre y 0.002 kg/ha de cianuro. En temporada de lluvias al llevarse a cabo el tratamiento fisicoquímico la carga de contaminantes del efluente del TPQ

serán de 0.04 kg/ha de boro, 0.39 kg/ha de manganeso, 0.24 kg/ha de níquel, 0.11 kg/ha de zinc, 0.03 kg/ha de cromo, 0.002 kg/ha de cobre y 5×10^{-3} de cianuro (Figura 25).

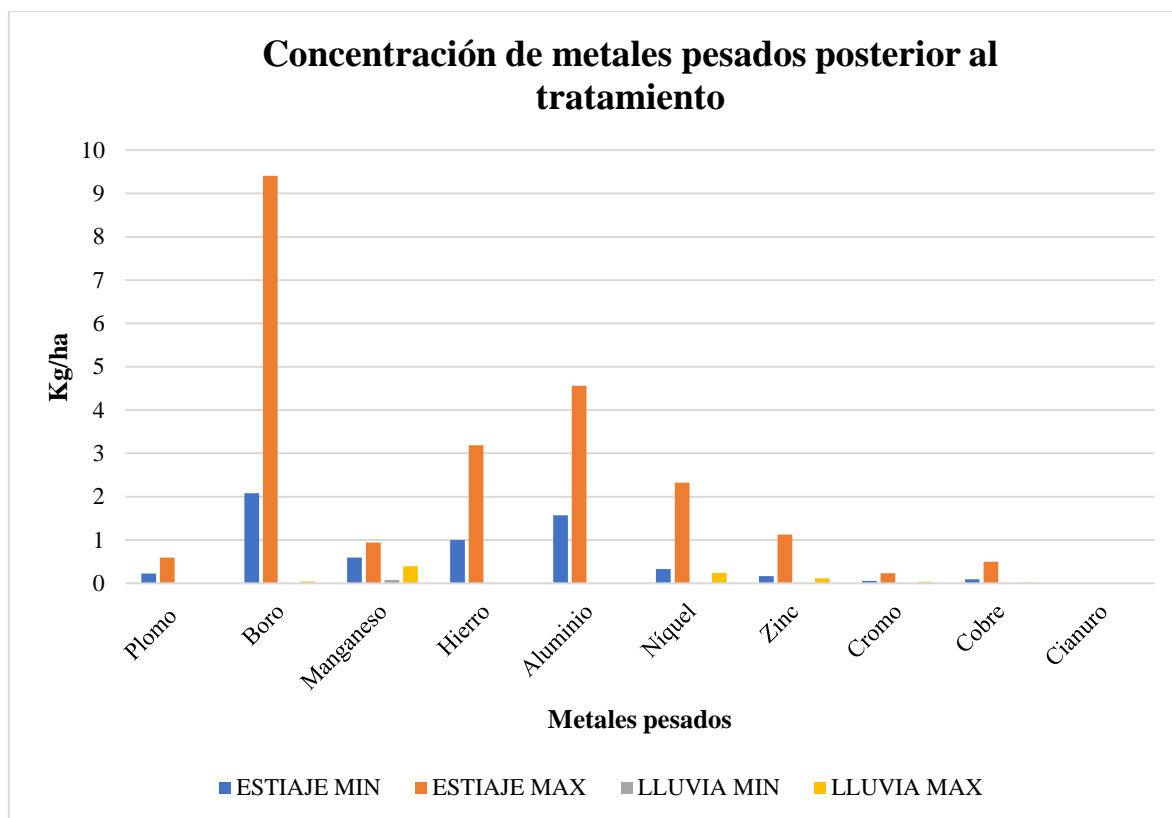


Figura 25. Carga de metales pesados en ambas temporadas posterior al tratamiento (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

Salinidad

Las sales contenidas en el agua residual sin tratar rebasan por mucho los LMP (índice entre 890 y 1123), incluso al llevarse a cabo el tratamiento biológico y fisicoquímico, estas podrían estar en grandes cantidades en los efluentes tanto del TPC, como del TPQ. El tratamiento biológico removerá el 95% de fluoruro y el 99% de SDT, mientras que el tratamiento fisicoquímico removerá el 80% de fluoruro y el 90% de SDT teóricamente. La concentración máxima de fluoruro en el efluente del TPC será de 0.65 kg/ha al año, mientras que en temporada de lluvia será de 0.20 kg/ha en el efluente del TPQ. En cuanto a los SDT, su concentración en el efluente del TPC será de 7.59 kg/ha al año, mientras que en temporada de lluvia será de 2.5 kg/ha al año (Figura 26).

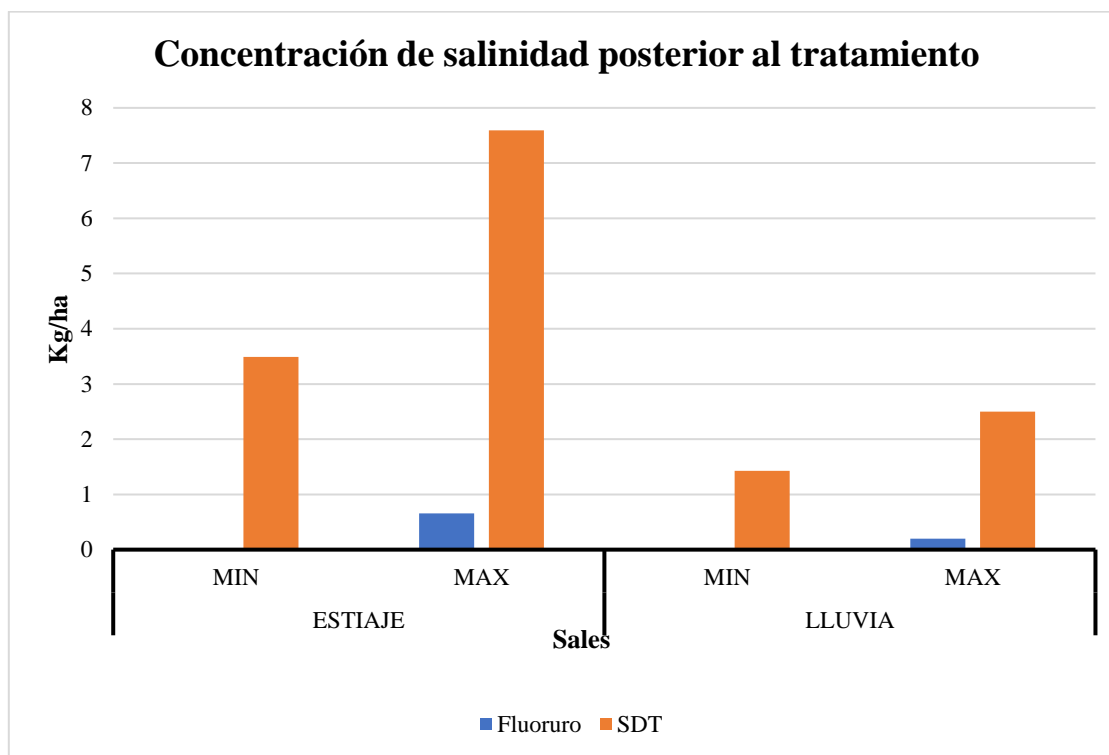


Figura 26. Concentración de salinidad en ambas temporadas posterior al tratamiento (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

3.3.2.- Agua residual que no será tratada y sus implicaciones.

Como ya se mencionó, no toda el agua que se generará en el valle de México y que llegará al valle de Mezquital será tratada, por lo que es importante establecer el impacto que tendrá esta medida.

Materia orgánica y nutrientes.

La materia orgánica y los nutrientes son esenciales para los cultivos. Como ya se mencionó, en el Valle del Mezquital estos han sido un beneficio para la agricultura de riego, ya que como los agricultores de la zona argumentan, han disminuido la inversión en fertilizantes. Es muy probable que después de 1920, año en el que se inició el riego propiamente en el DR003 se hayan descubierto estos beneficios. De esta manera el agua residual ya no solo se consideró un recurso que satisfizo la demanda de agua de la zona, sino que adicionalmente proporcionaba materia orgánica y nutrientes (agua cargadita, como le llaman los agricultores).

En cuanto a los nutrientes se realizó un balance para conocer la oferta de nutrientes que habrá para uno de los cultivos más importantes del Valle del Mezquital, el cual es el maíz (Tabla 20). En el Valle del Mezquital se riegan 85000 hectáreas, el agua residual sin tratar aporta 1725.67 kg/ha al año de nitrógeno y 996.27 kg/ha al año de fósforo.

El maíz tiene un rendimiento de 11.9 toneladas por hectárea al año, por lo cual se requieren de 1071 kg/ha al año de nitrógeno y de 535.5 kg/ha al año de fósforo. El efluente del TPC aportará 116.5 kg/ha al año de nitrógeno, mientras que el TPQ aportará 93.43 kg/ha al año, dando un resultado de 209.48 kg/ha al año.

En estiaje se aportarán 38.42 kg/ha al año de fósforo, mientras que en lluvia se aportarán 98.15 kg/ha al año, lo cual es un total de 136.58 kg/ha al año (Figura 27). Por lo anterior, el agua residual tratada no podrá cubrir los requerimientos de las plantas, ya que habrá un déficit del 80.4% para nitrógeno y de 74.4% para fósforo. Lo cual se traducirá en la inversión en fertilizantes por parte de los agricultores a quienes se les gestione el agua residual tratada.

Tabla 20. Requerimiento de nitrógeno y fósforo para el cultivo maíz en el Valle del Mezquital

Cultivo	Rendimiento (Ton/ha)	Requerimiento de N (Ton/ha)	Requerimiento de P (Ton/ha)	Rendimiento *N	Rendimiento *P	Requerimiento (kg/ha) de Nitrógeno	Requerimiento (kg/ha) de Fósforo
Maíz	11.9	0.09	0.045	1.07	0.53	1071	535.5

Elaboración propia con base en FAO (2017). Los fertilizantes y su uso; CONAGUA, “Estadísticas agrícolas de los distritos de riego” y “Superficies regadas y volúmenes distribuidos en los distritos de riego” para los años agrícolas 1997-2014, 2016. Especificaciones: “N” representa Nitrógeno y “P” Fósforo.

De manera adicional en temporada de estiaje no se tratará un flujo de $457 \times 10^6 \text{ m}^3$ y en temporada de lluvia un flujo de $268 \times 10^6 \text{ m}^3$. Al no conocer el destino de estos gastos y de poder gestionarse a los agricultores, se podría proveer materia orgánica y nutrientes para los cultivos y de esta manera complementar la demanda de nutrientes reduciendo los costos en fertilizantes. En la Figura 27 se puede observar que las concentraciones de parámetros de materia orgánica son hasta 10 veces superiores en cuanto a los SST y 22 veces más en relación con la DBO_5 , comparados con los gastos tratados. Se puede observar que la concentración anual de nitrógeno será de 1080 kg/ha, mientras que la de fósforo será de

674.47 kg/ha al año. Lo anterior refleja que los requerimientos de materia orgánica y nutrientes se satisfacen en los gastos no tratados y por lo cual se deberá considerar el gestionamiento apropiado para este recurso hídrico.

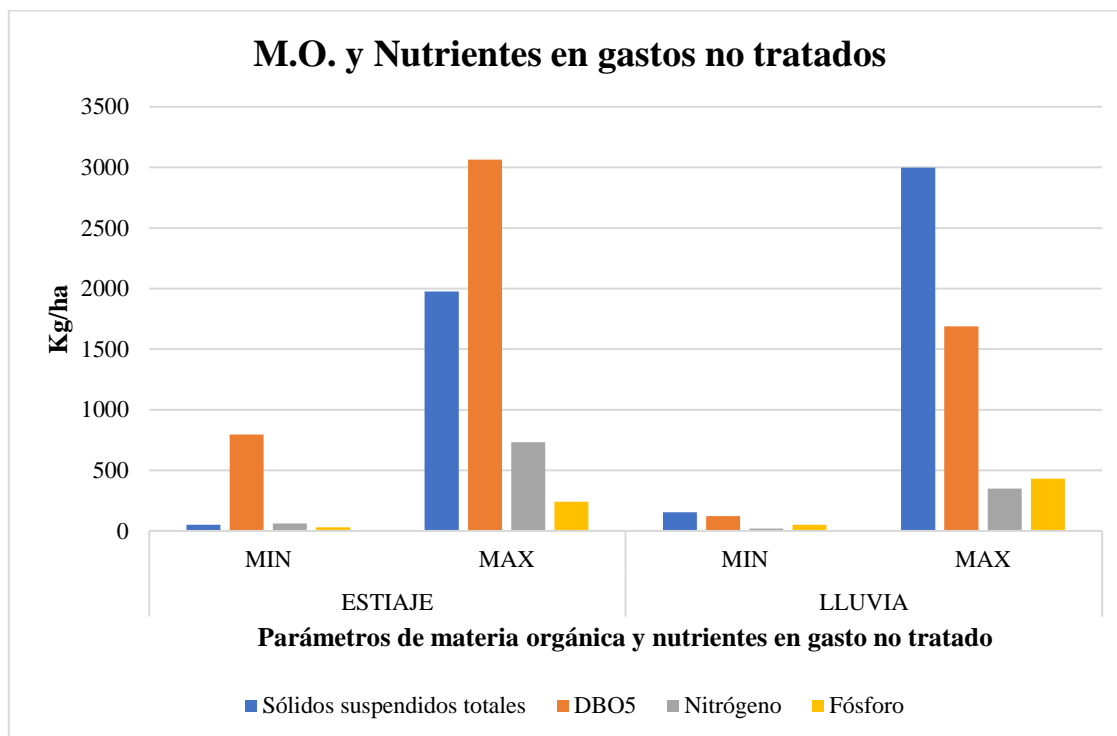


Figura 27. Aportación de materia orgánica y nutrientes en ambas temporadas en gasto no tratados. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

Microorganismos y metales pesados

El tratamiento que se llevará a cabo por medio de la PTAR Atotonilco será benéfico para la salud de la población de la zona del Valle del Mezquital. Uno de los objetivos del saneamiento integral de la zona. Sin embargo, el tratamiento solo tratará el 44% del flujo total que llega al Valle en estiaje y el 67% en temporada de lluvia. Al existir gasto que no serán tratados en ambas temporadas, estos contendrán concentraciones de microorganismos y metales pesados muy similares a las que llegan a esta zona por el Emisor Central y demás infraestructuras de drenaje. Lo anterior representa un riesgo para la población que no será resarcido y para el cual deberán tomarse las medidas necesarias para evitar el incremento en

el corto plazo de enfermedades entéricas y en el largo plazo de cáncer y enfermedades renales.

Ya que no se pudo realizar un balance de masa para los coliformes fecales, se tomaron como referencia las concentraciones en unidades logarítmicas que tienen los coliformes fecales en ambas temporadas (Figura 28). En este sentido, si los agricultores y la población tuvieran contacto directo con los gastos no tratados, el riesgo de enfermedades entéricas no desaparecerá pese al tratamiento que realice la PTAR. El agua sin tratamiento contendrá una concentración de 6.85 unidades logarítmicas de este parámetro en temporada de lluvia y de 7.51 unidades logarítmicas en temporada de estiaje (Figura 28). En temporada de estiaje se incorporará hasta 117 HH/ha, mientras que en temporada de lluvia será de 150 HH/ha, lo cual representa que anualmente un contenido de 267 HH/ha (Figura 29). Los huevos de helminto al igual que los coliformes fecales representan un riesgo de padecer enfermedades entéricas, como ya se ha mencionado en diversas ocasiones, la principal enfermedad es Ascariasis.

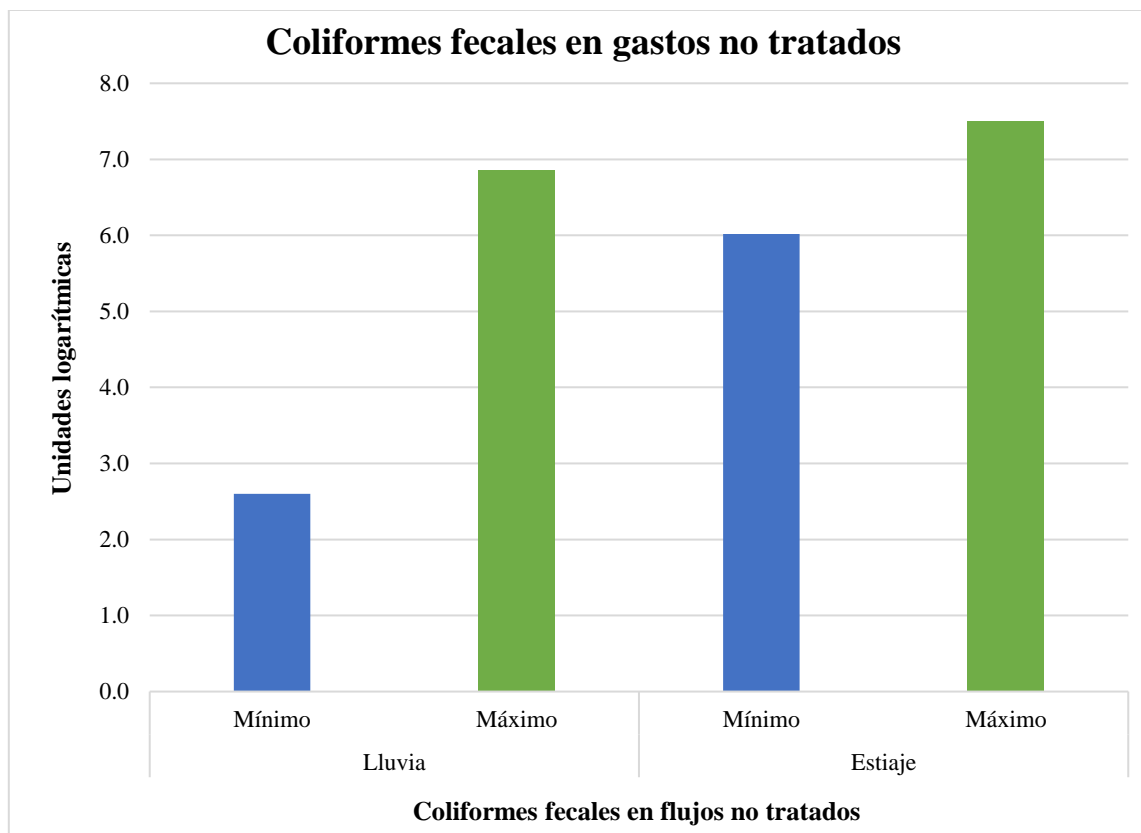


Figura 28. Concentración de coliformes fecales en los gastos no tratados en ambas temporadas. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

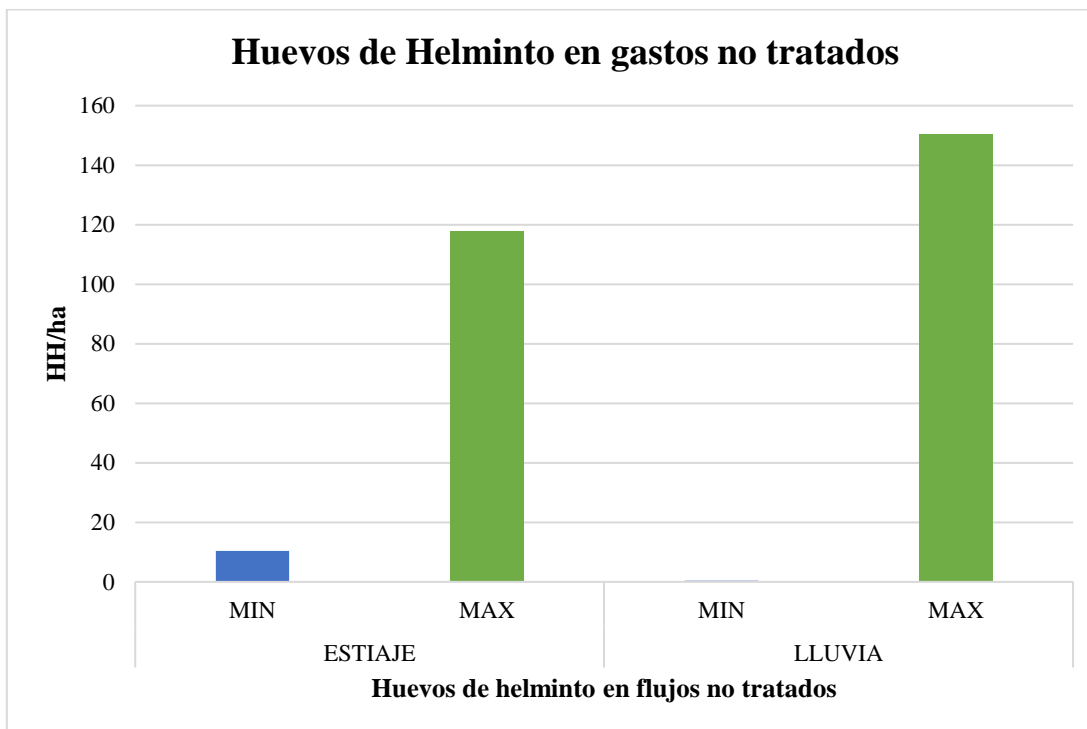


Figura 29. Contenido de huevos de helminto en los gastos no tratados en ambas temporadas (HH/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua.

En cuanto a los metales, en temporada de estiaje se podrá incorporar a los suelos agrícolas una cantidad de 11.8 kg/ha de boro, 5.8 kg/ha de manganeso, 5.74 de aluminio, 4.02 de hierro, 2.93 de níquel, 1.41 de zinc, 2.91 kg/ha de cromo, 3.1 kg/ha de cobre y 0.49 kg/ha de cianuro. Y de manera adicional, en temporada de lluvia la carga de estos metales será de 6.76 kg/ha de boro, 13.2 kg/ha de manganeso, 13.06 kg/ha de hierro, 20.08 kg/ha de aluminio, 2.1 kg/ha de níquel, 2.1 kg/ha de zinc, 2.8 kg/ha de cromo, 2.25 kg/ha de cobre y 0.57 kg/ha de cianuro (Figura 30). De acuerdo con estos resultados, se debe tener precaución con el cromo que es un metal pesado cancerígeno y también asociado con padecimientos renales y con el cianuro que es altamente tóxico, puede producir cáncer de piel y otros tipos de cáncer (OMS, 2008).

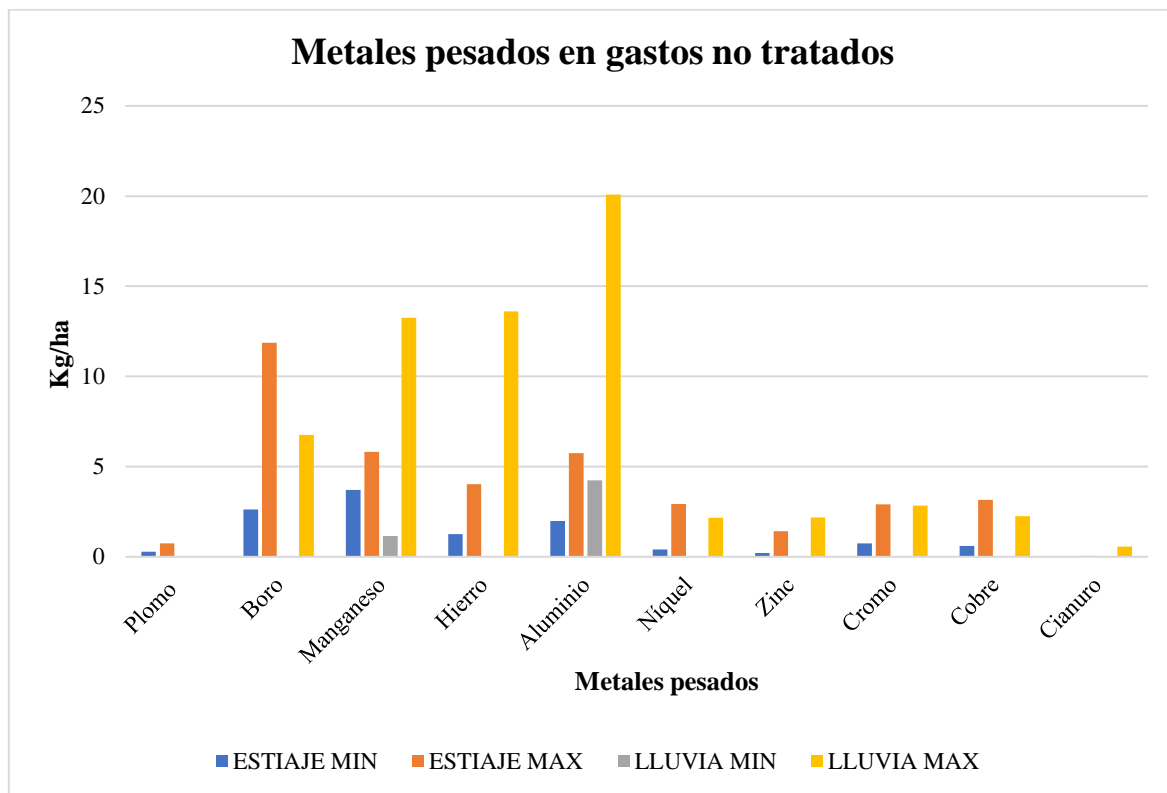


Figura 30. Carga de metales pesados en los gastos no tratados en ambas temporadas (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

En cuanto a las amenazas sanitarias, se deberán valorar alternativas para los gastos que no serán tratados por medio de la PTAR. No se debe omitir que la morbilidad por enfermedades entéricas, ya que anualmente el número de casos en el Valle del Mezquital representa el 21% del total de casos en el estado (SIIEH, 2016). De la misma manera, la mortalidad por enfermedades renales en el Valle del Mezquital representa el 39.4% de las muertes en todo el estado por este tipo de padecimiento (Ibidem, 2016).

Las enfermedades entéricas se desarrollan en un corto plazo y pueden ser tratadas a la brevedad, incluso profilácticas, por lo cual no representan un riesgo en el largo plazo como las enfermedades renales. Si bien las enfermedades renales se desarrollan en un mediano y largo plazo, se debe considerar que la inversión en salud por parte del gobierno y la población misma que carece de seguridad social es muy elevada. En el Valle del Mezquital solo el 34% de la población tiene acceso a los servicios públicos de salud. El costo anual de las enfermedades renales en el Valle del Mezquital representa el 10% del gasto promedio anual

de los hogares en salud en esta zona. Estos costos podrían incrementarse en el mediano y largo plazo en la medida en que la población continúe expuesta a estos gastos no tratados.

Sales

Adicionalmente a las concentraciones de sales que habrán en los efluentes, el tratamiento fisicoquímico utilizará cloruro férrico (FeCl_3), una sal que será primordial en el tratamiento por coagulación-floculación en temporada de lluvias. Por lo anterior se deberá realizar un estudio de suelo en el mediano y largo plazo en que la PTAR entre en operación. Es muy probable que como consecuencia del tratamiento fisicoquímico el contenido de sales se incremente en esta temporada. También se debe considerar que si los gastos no tratados son vertidos en el suelo sin ser gestionados apropiadamente estos pueden ocasionar una mayor salinización del suelo.

La concentración máxima de fluoruro en temporada de estiaje en el flujo no tratado será de 8.29 kg/ha al año, mientras que en temporada de lluvia será de 3.34. Por otro lado, las concentraciones de SDT serán muy elevadas en los gastos no tratados, 4787 kg/ha en temporada de estiaje y de 8335 kg/ha en temporada de lluvia (Figura 31). Los suelos del Valle son salinos, ya que presentan una alta conductividad eléctrica (ver sección 3.3.2). Para reducir la salinidad de manera natural se requiere de un mayor lavado de sales con agua de riego, lo cual hasta ahora puede ser incierto, ya que no se tiene conocimiento sobre la gestión integral del agua de riego posterior al tratamiento. Se debe tomar en cuenta por parte de los agricultores el fenómeno de la salinidad para la siembra y tolerancia de los cultivos a las sales en el mediano y largo plazo.

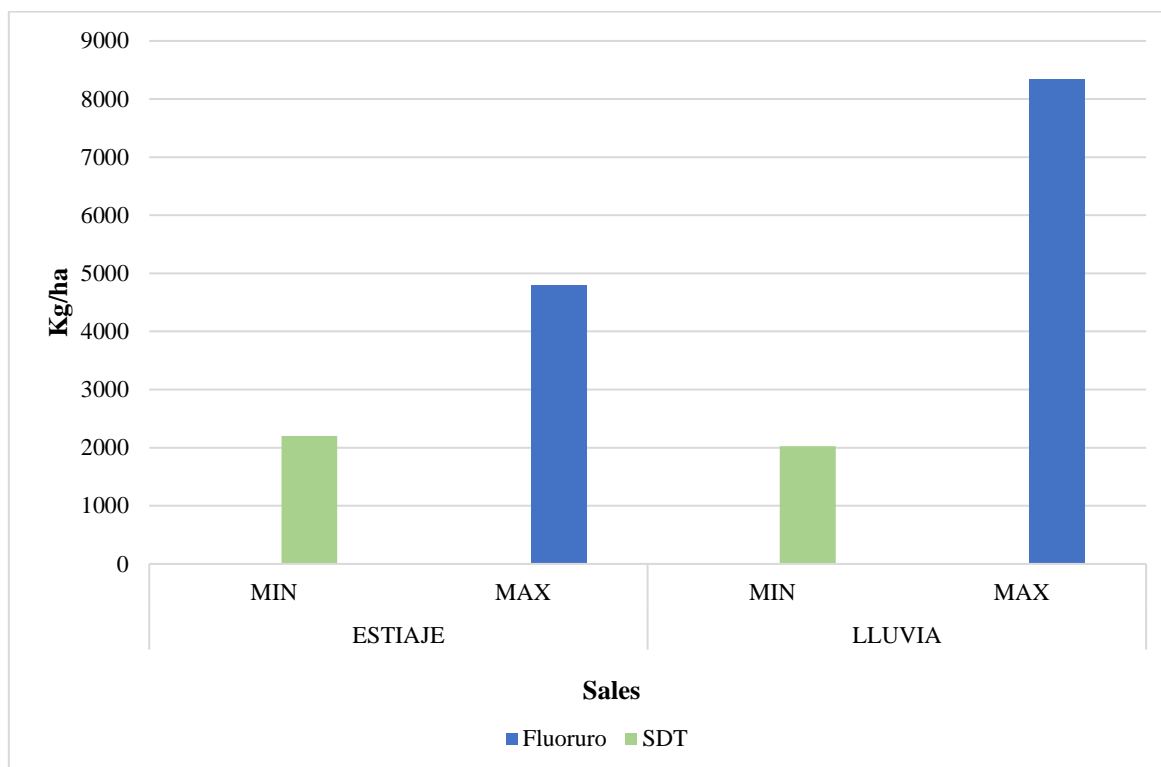


Figura 31. Carga de sales en los gastos no tratados en ambas temporadas (Kg/ha al año). Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

3.4.- Índices de calidad para el agua del acuífero

En el Valle del Mezquital existen dos tipos de acuífero, uno somero y otro profundo. El primero es el acuífero superficial, compuesto por manantiales, norias y la mayoría de los pozos tiene una profundidad de 10 m; mientras que el acuífero profundo está conformado por pozos con una profundidad de 40 m. Al llevarse a cabo el SAT y otros procesos de arrastre de agua y dilución con agua de lluvia, se modifica la calidad tanto del agua del acuífero somero como del acuífero profundo.

La modificación en la calidad del agua corresponde a un proceso de tratamiento natural del agua residual sin tratar, por lo cual es muy interesante el compararlo con las eficiencias en los procesos de tratamiento que tendrá la PTAR. A continuación, se muestran los índices de calidad del agua del acuífero, los cuales están relacionados con los LMP establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 y los cuáles más adelante se compararán con los índices del agua residual sin tratar y con los del agua residual tratada por la PTAR.

3.4.1.- Nutrientes

En cuanto al acuífero somero en temporada de lluvia los nitratos tienen un índice máximo de 2.72, los nitritos de 0.10 y el nitrógeno amoniacal de 10.25 (Figura 32). En el acuífero somero los nitratos y el nitrógeno amoniacal tienen índices más elevados que en el acuífero profundo porque son componentes del agua residual sin tratar, el agua residual se combina con el agua del acuífero superficial y las concentraciones se diluyen, por ende, son menores que en el agua residual sin tratar. A través del tratamiento suelo acuífero se llevan a cabo algunas fases del ciclo del nitrógeno y el amoniaco se convierte en nitritos, por lo cual disminuye la concentración de nitrógeno amoniacal y aumenta la concentración de nitritos en el acuífero profundo.

Con base en lo antes expuesto, en la Figura 32 se pueden observar los índices máximos en el acuífero profundo de nitrógeno amoniacal en temporada para el cual solo hay datos en lluvia, y el cual es de 2.5. El índice máximo de nitratos en el acuífero profundo está únicamente reportado en temporada de estiaje y es de 1.24. Los nitritos tienen un índice máximo en lluvia de 1.27 y en temporada de estiaje de 0.01 en el acuífero profundo.

Los compuestos de nitrógeno que pueden resultar tóxicos son el amoniaco y los nitratos. El amoniaco se encuentra dentro del nitrógeno amoniacal y en el medioambiente puede no causar toxicidad, pero ocasiona ineficiencia en la desinfección y tratamiento de agua. Los nitratos pueden causar enfermedades hematológicas en el ser humano como la metahemoglobinemia, la cual es más común en los niños. Esto ocurre siempre y cuando estos sean ingeridos a través del agua (OMS, 2008).

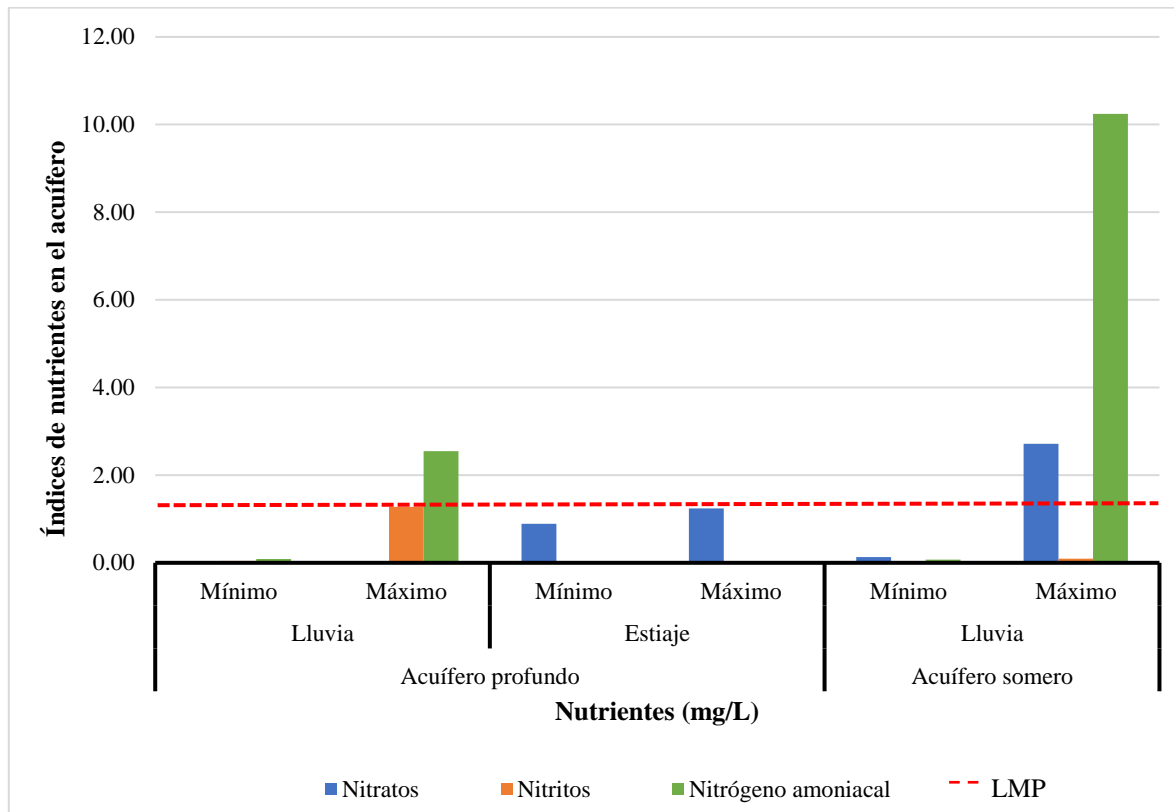


Figura 32. Índices de nutrientes en acuífero. Elaboración propia con base en IINGEN 2007-2008. Muestreo en lluvia y estiaje de parámetros de calidad del agua

3.4.2.- Microorganismos

En el acuífero somero, hay una remoción de 99.9% de coliformes fecales, ya que estos no son detectados, sin embargo, el contenido de HH se reporta hasta 8 HH/L (Figura 33). Al llevarse a cabo el SAT, los coliformes fecales son retenidos en el suelo en un 99.9% y se eliminan hasta dos unidades logarítmicas a través de este proceso; sin embargo, en el agua residual se pueden encontrar hasta 7 unidades logarítmicas. Lo anterior refiere que se debe tener precaución al emplear el agua del acuífero para beber, pues es muy posible que las personas que realicen esta actividad enfermen de Ascariasis. La presencia de HH en el acuífero superficial se debe a que el agua residual se combina con este tipo de acuífero, aunque hay un efecto de dilución y la concentración es menor que en el agua residual.

Mientras tanto en el acuífero profundo, se encuentran microorganismos como los coliformes fecales, los cuales en temporada de lluvia alcanzan 1.10 unidades logarítmicas y en temporada de estiaje 4.6 unidades logarítmicas (Figura 33) (Lesser C., 2011). La presencia de coliformes fecales en el acuífero profundo se puede atribuir al vertimiento del agua residual en el suelo y a una contaminación antropogénica de las comunidades del Valle del Mezquital. Ambas prácticas aportan nutrientes al suelo y permiten la supervivencia y multiplicación de microorganismos patógenos. Los coliformes fecales se infiltran en el acuífero por las características del subsuelo, el cual puede tener fracturas o cavidades de dilución que permiten el paso de estos microorganismos (Pacheco, y otros, 2017). Las razones de que haya una menor cantidad de coliformes fecales en temporada de lluvia es que la precipitación permite que haya una mayor dilución, lo cual no ocurre en temporada de estiaje.

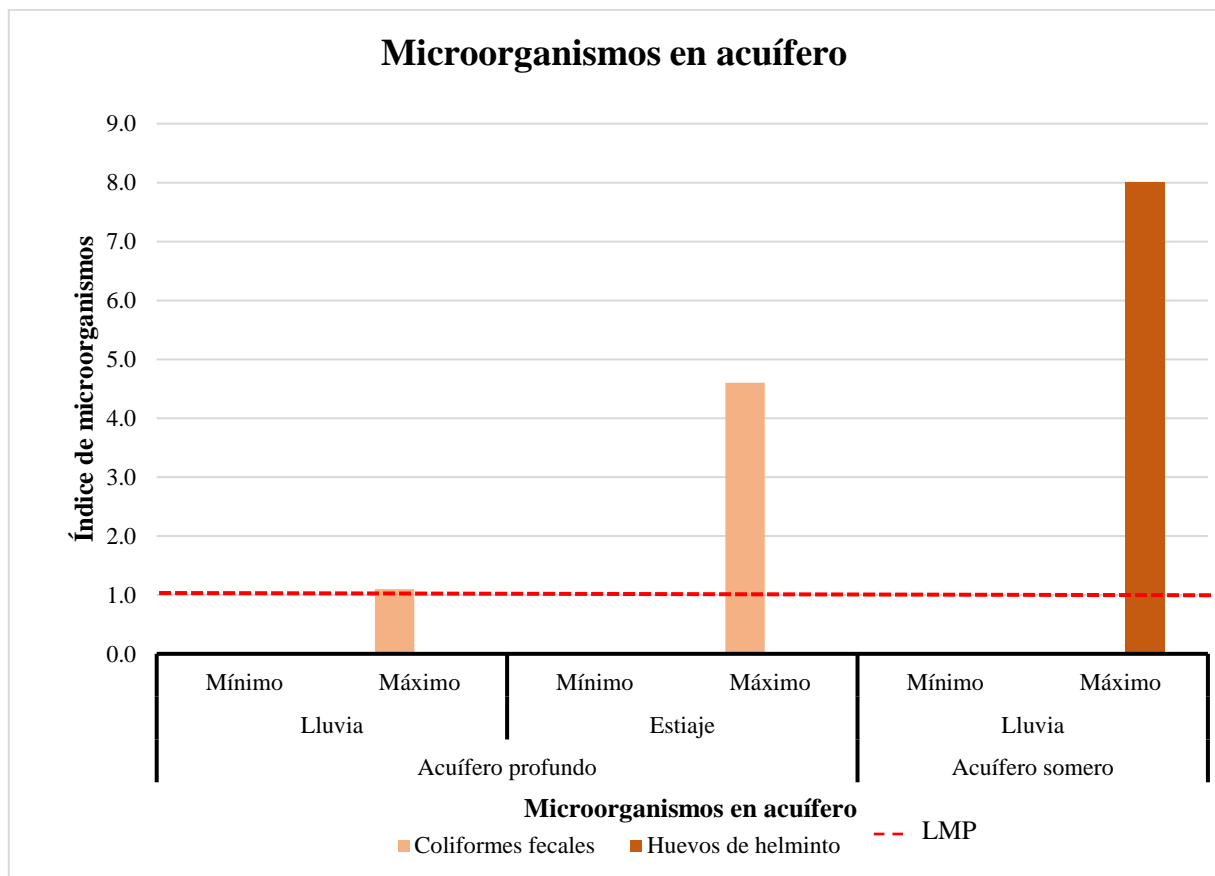


Figura 33. Índices de microorganismos en acuífero. Elaboración propia con base en Lesser et al., (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el Valle del Mezquital

3.4.3.-Metales pesados

Para esta investigación en el acuífero somero no se reporta la presencia de metales pesados que sobrepasen los LMP (Figura 34). Lo anterior se debe a que algunos metales pesados son solubles en agua y por ende estas fracciones solubles son móviles y se desplazan por agua de lluvia y se lixivian en el acuífero profundo o se transportan a otros lugares por escorrentía superficial (Pulido B. & Vallejos I., 2003). Para el caso del acuífero profundo, como ya se mencionó, los metales pesados se lixivian del agua residual sin tratar y acuífero somero hacia el acuífero profundo, esta acción ocurre a través del SAT por medio de la dispersión y dilución. Lo anterior, provoca que en temporada de lluvia el arsénico y el hierro tengan índices de 8.5 y 1.2 respectivamente; mientras que en temporada de estiaje el hierro sobrepasa el LMP con un índice de 1.4 (Figura 34).

El arsénico es un metal que no fue encontrado en el agua residual sin tratar, sin embargo, se encuentra en el acuífero, lo cual se debe a que puede movilizarse de las rocas a escalas de pH típicas de aguas subterráneas (6.5-8.5), el acuífero profundo del Valle tiene pH máximo de 8.4 (Lesser C., 2011). El arsénico puede ocasionar cáncer de piel, vejiga y pulmones y de acuerdo con esto, el agua del acuífero no debe ser ingerida (OMS, 2008).

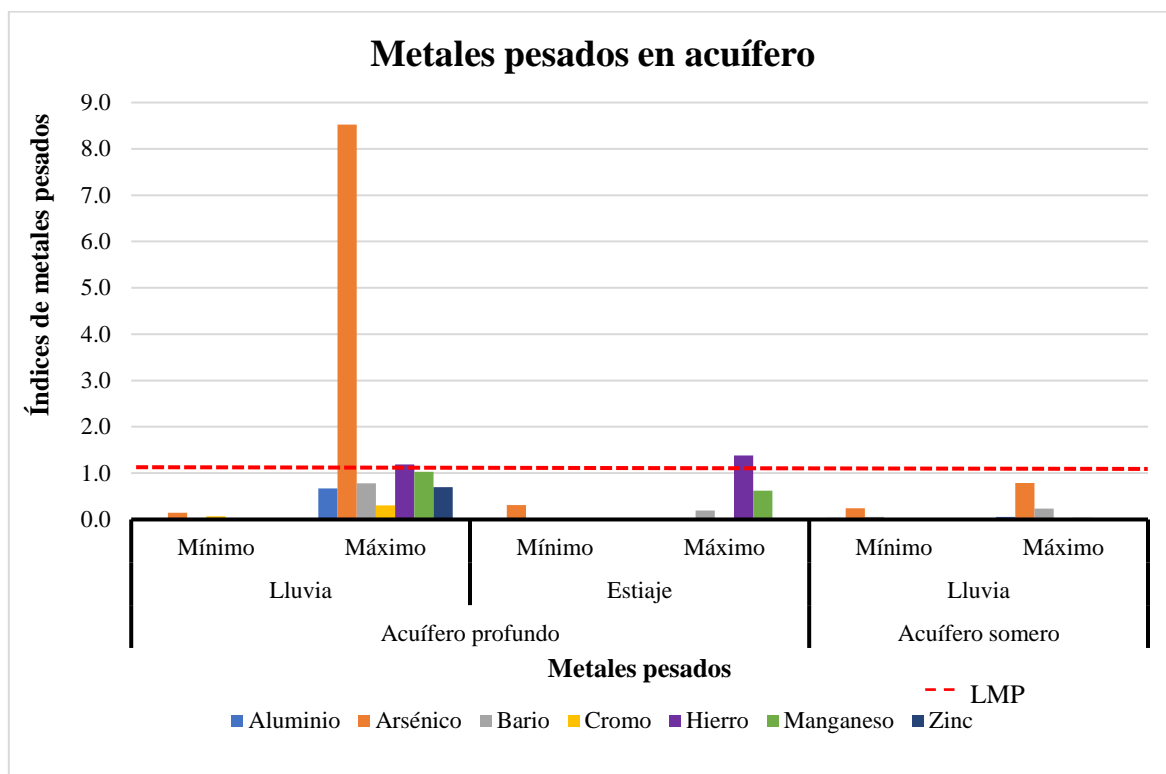


Figura 34. Índices de metales pesados en acuífero. Elaboración propia con base en Lesser et al., (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el Valle del Mezquital

3.4.4.- Salinidad

La salinidad en el acuífero fue medida en este trabajo por medio de tres parámetros, sodio, sólidos disueltos totales y cloruros. El acuífero somero en temporada de lluvia tiene un índice máximo de 1.48 de sodio y de 1.30 para SDT (Figura 35). En el acuífero somero hay una menor presencia de sales, la razón es que ocurre algo similar a lo que ocurre con los metales pesados ya que las sales son altamente solubles. La solubilidad del sodio, los cloruros y los SDT es muy elevada, entonces estos pasan al acuífero por medio del SAT a través de los procesos de adsorción, absorción y dispersión.

Además de los procesos de adsorción, absorción y dispersión llevados a cabo por el SAT, los acuíferos profundos tienen altas concentraciones de sales que provienen del suelo y rocas. El acuífero profundo presenta cantidades de cloruros y sodio que exceden los LMP. Los cloruros tienen un índice máximo de 3.07 en época de estiaje y de 0.73 en época de lluvia. El sodio tiene un índice de 2.1 en época de estiaje y de 2.2 en época de lluvia. Los

SDT tienen un índice de 2.83 en época de estiaje y de 2.2 en época de lluvia. (Figura 35). Una alta ingesta de agua con alto contenido de sodio, sales y cloruros puede provocar enfermedades cardiovasculares como la hipertensión arterial (OMS, 2008).

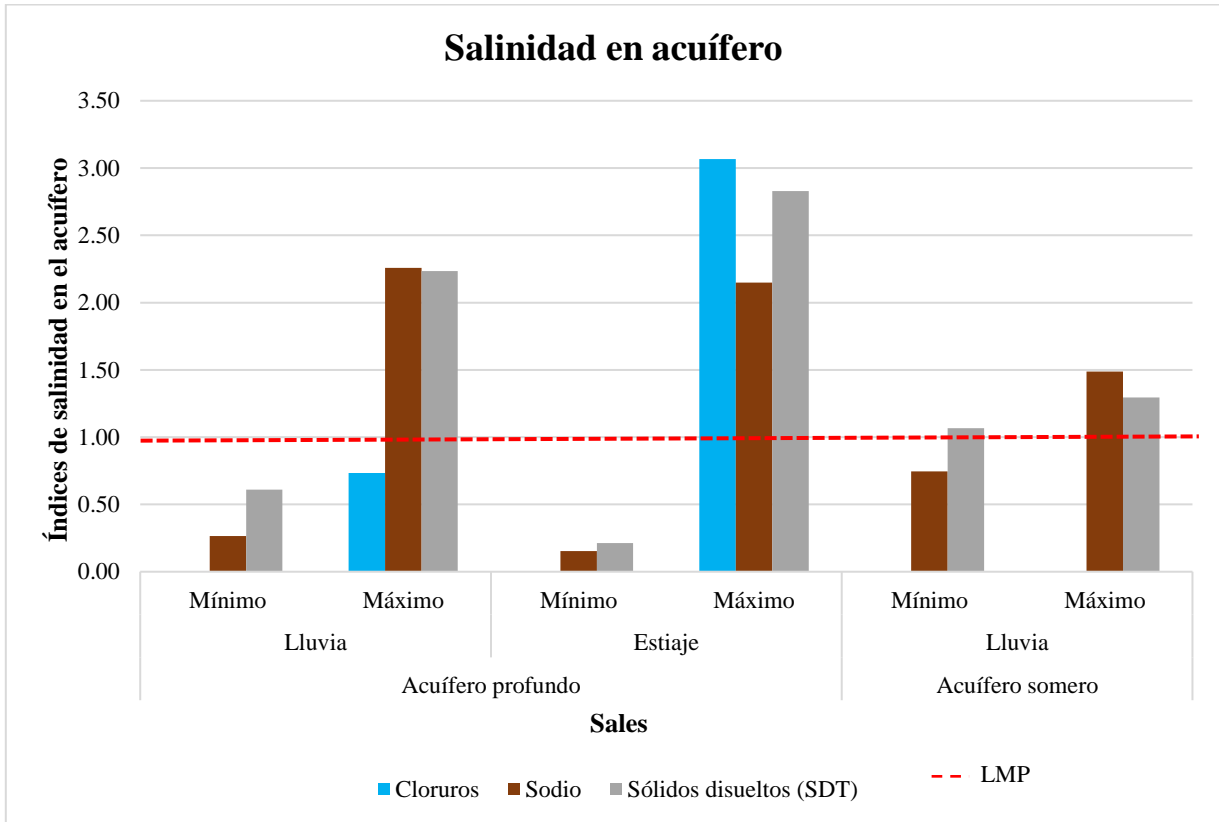


Figura 35. Índices de salinidad del acuífero. Elaboración propia con base en Lesser et al., (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el Valle del Mezquital

3.5.- Resumen de los impactos ambientales, sanitarios y económicos del reúso y recarga de agua residual en el Valle del Mezquital.

A manera de balance, se conjuntan los impactos ambientales sociales (salud) y económicos del reúso de agua residual sin tratar en el Valle del Mezquital, los cuales han repercutido principalmente en los suelos y en la recarga del acuífero. Estos impactos se presentan en esta sección y a su vez se clasifican en positivos (+) y negativos (-) según su naturaleza (Véase Tabla 21). Para la elaboración de esta tabla se consideraron los análisis histórico, de productividad de los Distritos de Riego y las amenazas sanitarias, así como los índices para calidad de agua residual y del acuífero; y, finalmente la caracterización de suelos.

Tabla 21. Impactos ambientales, económicos y sociales del reúso y recarga de agua residual en el Valle del Mezquital

Impactos	Ambientales	Salud	Económicos
Suelos	A ₁) Necesidad de un mayor lavado de sales (-) A ₂) Acumulación de metales pesados en suelos. (-)	B ₁) Incremento del riesgo de enfermedades entéricas y posible riesgo de padecer enfermedades crónicas asociadas a metales pesados (-)	C ₁) Provisión de materia orgánica y nutrientes para cultivos C ₂) Creación de suelos productivos para la agricultura. (+)
Recarga del acuífero somero y profundo	A ₃) Formación de nuevas fuentes de abastecimiento como manantiales, pozos y norias a partir de la recarga y el SAT. (+) A ₄) Mejora de la calidad del agua del acuífero a partir del SAT. (+) A ₅) Contaminación de cuerpos de agua al vertirse agua residual sin tratar en estos. (-)	B ₂) Calidad del agua no apta para consumo humano a pesar del SAT (presencia de microorganismos, sales y metales pesados). (-)	C ₃) Satisfacción de la demanda de agua a partir de nuevas fuentes de abastecimiento y reducción de costos por potabilización. (+)

Elaboración propia con base en datos de Cifuentes et al., 1994; Siebe et al., 1994; Jiménez et al., 2004, CONAGUA, 2014

3.5.1.- Impactos del empleo del agua residual sobre el suelo

A) Ambientales

A1) Necesidad de un mayor lavado de sales

Como ya se mencionó, debido a que el agua residual sin tratar es altamente salina y que el periodo de riego data de 1920, algunos suelos contienen altas cantidades de sales y se vuelven improductivos para la agricultura. Para solventar esto se requiere de un mayor lavado de sales para que estas puedan infiltrarse hacia zonas más profundas como lo es el acuífero y de esta manera se evita que las sales se concentren en las raíces de los cultivos e impidan que se desarrollen. La necesidad de lavar los suelos beneficia a estos, pero perjudica al acuífero, en el cual elevan las cantidades de sales, como ya se vio en los altos índices de sulfatos, fluoruro y SDT descritos en la sección 3.5.1.

A2) Acumulación de metales pesados en suelos.

Un impacto negativo es la acumulación de metales pesados en los suelos del Valle del Mezquital. Hasta ahora se ha establecido que estos no rebasan los Límite Máximos Permisibles a nivel nacional. Sin embargo, al pasar de los años hay mayores cantidades de metales pesados acumulados en suelos irrigados con agua residual sin tratar que en suelos regados con agua de temporal (Siebe, 1995). Tomando como base los metales pesados en temporal, al realizar estimaciones de incremento de metales pesados por el riego con agua residual sin tratar, se obtienen porcentajes de incremento tras ochenta años de riego.

En la Tabla 22 se puede observar que el cadmio ha incrementado un 13% en los leptosols durante este periodo, mientras el plomo y el zinc se han incrementado en 35.9% y 43.7% respectivamente en este tipo de suelo. Anualmente el cadmio se incrementa en un 0.22% en los vertisoles, mientras que el plomo, el cobre y el zinc se incrementan en 0.45%, 0.32% y 0.55% respectivamente, en los leptosoles. El hecho de que los suelos acumulen metales pesados puede influir en la productividad en el largo plazo de los mismos, así como en un riesgo para la salud de la población que reside en el Valle del Mezquital. También sería muy costoso eliminar los metales pesados del suelo, ya que las tecnologías de remediación de suelo se llevan a cabo en países como España, pero en México sería poco rentable considerando el tamaño del Valle (85,000 ha).

Tabla 22. Acumulación de cadmio, plomo, cobre y zinc en suelos irrigados con agua de con agua residual sin tratar

Clase de suelo	Incremento en 80 años				Incremento anual			
	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
Leptosoles	13.04%	30.73%	25.63%	28.11%	0.16%	0.38%	0.32%	0.35%
	11.40%	35.92%	25.71%	43.78%	0.14%	0.45%	0.32%	0.55%
	8.48%	14.32%	17.03%	22.13%	0.11%	0.18%	0.21%	0.28%
Vertisoles	10.87%	30.48%	29.33%	20.00%	0.14%	0.38%	0.37%	0.25%
	12.28%	24.38%	24.47%	27.60%	0.15%	0.30%	0.31%	0.35%
	17.39%	20.86%	14.81%	25.32%	0.22%	0.26%	0.19%	0.32%

Fuente: Modificado de Siebe et al. (1995). Impacto ambiental del riego con agua residual en el Centro de México:

B) Sanitarios

B₁) Posibles amenazas sanitarias por enfermedades entéricas e insuficiencia renal crónica (IRC)(-)

El suelo y el acuífero del Valle del Mezquital han sido depósitos de algunas cargas de contaminantes microbiológicos y químicos. Estos incrementan el riesgo de la población de padecer enfermedades entéricas en el corto plazo por lo cual es un impacto negativo. Estas últimas han sido poco analizadas en la zona, para que se pueda tener una mejor aproximación de las amenazas para la salud pública que pueden provocar (Revisar sección 3.3 y 3.4).

Las problemáticas a consecuencia del reúso y la recarga de agua residual son diversas. La más estudiada es la relacionada con el contacto con agua residual sin tratar que provoca enfermedades entéricas, ya que las personas no lavan las verduras o los agricultores no se lavan las manos después de manipular agua residual y comen con las manos sucias. En 1991, las autoridades locales, estatales y federales reconocieron la problemática a consecuencia del riego con agua residual y los brotes de cólera.

En el Valle del Mezquital se cultivaban hortalizas con agua residual sin tratar, la práctica quedó prohibida casi en todos los países donde se utilizaba agua residual en la agricultura (Fabre P., 2004). Se prohibió la producción de lechuga, col, zanahoria, betabel, etc., determinó la prevalencia de *Ascaris lumbricoides*, *Giardia lamblia* y *E. histolytica* en población expuesta y semiexpuesta en el Valle del Mezquital (Cifuentes, 1994). Los resultados arrojaron que la prevalencia de enfermedades como la parasitosis es mayor en la

población que está expuesta, mientras que las *Giardiasis* y *Amibiasis* son mayores en la población semiexpuesta (Tabla 23). Microorganismos como los huevos de helminto también pueden permanecer en los suelos y ser un foco de infección (Blumenthal, 1992).

Tabla 23. Prevalencia de parasitosis intestinales en el Valle del Mezquital por grupos de edad y exposición

Prevalencia de parasitosis intestinal por exposición (porcentaje)			
<i>Ascaris Lumbricoides</i>			
Grupo por edad	Expuesto	Control	Semiexpuesto
0-4 años	15.3	2.7	3.3
5-14 años	16.1	1	2
>15	22.2	4.5	2.9
<i>Giardia lamblia</i>			
0-4 años	13.6	13.5	15.9
5-14 años	9.6	9.8	10.8
>15	2.3	2.5	4.8
<i>Entamoeba histolytica</i>			
0-4 años	7	7.3	5.4
5-14 años	16.4	12	16.1
>15	16	13.8	14.5

Fuente: Modificado de Cifuentes et al. (1994). Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual.

Los metales pesados en los suelos son un impacto negativo ya que representan no solo un problema ambiental, sino que un sistema sanitario. Se han encontrado metales como cobre, zinc y cromo en el agua residual (Siebe G. C. , 1994), aluminio, cromo, plomo y cadmio en el acuífero y cadmio, plomo, cobre y zinc en los suelos que han sido regados por más de ochenta años con agua residual (Siebe G. & W.R., 1996). Los estudios reportan que estos metales no han sobrepasado los límites máximos permisibles en México, pero deben seguirse analizando, pues estos representan un riesgo para la salud de la población. Los riesgos que los metales pesados representan para la población son enfermedades renales, además de provocar alergias, intoxicación y están asociados al cáncer (Espinosa G., Aguilar Medina, & Mazari H., 2010).

Algunos metales pesados como el cadmio y el cromo pueden ingresar al organismo humano por inhalación. Aunque la mayoría logran entrar por medio de los alimentos (OMS,

2008). Es por ello que es importante realizar estudios para saber la absorción de metales pesados en algunos cultivos. En el caso específico en el Valle del Mezquital es necesario analizar la absorción de metales pesados por medio del maíz y legumbres para consumo humano ya que no hay estudios reportados. De la misma manera se debe analizar la absorción de metales pesados por algunos forrajes como la alfalfa y la cebada.

C) Impactos económicos

C1) Provisión de materia orgánica y nutrientes para cultivos.

En la sección 3.2.2 se menciona la productividad de los distritos de riego a través del sistema hídrico-productivo. Se ha establecido que gracias al recurso agua residual la zona del Valle del Mezquital es altamente productiva en cuanto a forrajes, lo cual se considera un impacto positivo. Esto se debe en gran medida a que por un periodo de 97 años los suelos han obtenido nutrientes y materia orgánica que han sido de gran utilidad para la agricultura.

La materia orgánica del suelo se ha incrementado gracias al uso de agua residual sin tratar. Jiménez y colaboradores (2011) establecen que después de 97 años de riego, se incrementó la materia orgánica de 3.1% a 6.4%, lo cual mejora el suelo e incrementa la productividad. En cuanto a los nutrientes, el agua residual ha propiciado un incremento de diversos compuestos que incrementan la productividad de la actividad agrícola. El fósforo representa el doble del que se encuentra en sistema de temporal. También se ha incrementado el nitrógeno el cual es tres veces mayor al que se encuentra en las zonas de temporal (Jiménez Cisneros & Chávez M., 2011). Lo anterior sugiere que los suelos irrigados con agua residual sin tratar son más productivos que los suelos de temporal de la misma zona de estudio.

C2) Creación de suelos productivos para la agricultura.

La creación de suelos es un impacto positivo en el Valle de Mezquital. Los feozem son el tipo de suelo que se encuentra en una mayor superficie en esta zona. Este tipo de suelos contienen una mayor cantidad de materia orgánica y nutrientes que el mismo tipo de suelo en otras zonas del país (ver Tabla 16). Los suelos obtienen materia orgánica y nutrientes del agua residual, proveyendo un alto nivel de nutrición para las plantas aquí sembradas. Las bacterias del suelo usan los residuos de plantas, animales y los derivados de la materia

orgánica contenida en el agua residual sin tratar como alimento. A medida que descomponen los residuos y la materia orgánica, los nutrientes en exceso como el nitrógeno y el fósforo son liberados dentro del suelo en formas en que las plantas pueden disponer de ellos (FAO., 2017) . Los productos de desecho que generan los microorganismos contribuyen a la formación de materia orgánica en los mismos.

En cuanto a los nutrientes, el fósforo es un nutriente primario, ya que es necesario para que las plantas crezcan y se reproduzcan de manera óptima (International Plant Institute (IPNI), 2017). Otro nutriente esencial es el nitrógeno. Este favorece el crecimiento vegetativo, provee la coloración verde a las hojas y funciona como gobernador en las plantas para el uso de potasio, fósforo y otros elementos (Ibidem, 2017). Por lo anterior, se pueden encontrar frutos de maíz del mayor tamaño comparado con un fruto de maíz en temporal en los sembradíos de esta zona.

3.5.2.- Impactos del empleo del agua residual en el acuífero

A) Ambientales

A₃) Formación de nuevas fuentes de abastecimiento como manantiales, pozos y norias a partir de la recarga y el SAT. (+)

Gracias a la recarga incidental del acuífero, la cual se lleva a cabo gracias al SAT, en el Valle del Mezquital se crearon nuevas fuentes de abastecimiento como manantiales, pozos y norias, los cuales ayudan a satisfacer la demanda de agua potable de la zona. Esto es un impacto positivo, pues la infiltración de 25 m³/s es 13 veces la recarga natural sin la presencia de agua residual sin tratar (Jiménez C. B. E., 2004). Esta recarga incidental ha propiciado que hoy en día en sitios donde el agua se encontraba a 50 m de profundidad, afloran manantiales con gasto de 40 a 60 L/s. Los nuevos manantiales, constituyen el único suministro para las actividades de la región (Ibidem, 2004)

A₄) Mejora de la calidad del agua del acuífero a partir del SAT. (+)

Los procesos que se llevan a cabo por medio del SAT mejoran la calidad del agua residual a través del suelo, lo cual se traduce como un impacto positivo. Al formarse manantiales, pozos y norias, estos tienen una mejor calidad de la que tiene el agua residual

sin tratar (Lesser C., 2011). Diversos estudios demuestran que los microorganismos son removidos gracias al tratamiento mencionado anteriormente (II, 2017), pero algunos contaminantes como los metales pesados no son removidos en su totalidad, lo cuales se acumulan y representa un riesgo para la salud.

A5) Contaminación de cuerpos de agua al vertirse agua residual sin tratar en estos. (-)

El agua residual llega al Valle del Mezquital y se vierte en los canales Salto-Tlamaco y Viejo-Requena. Se vierte en la presa Requena que pertenece al DR003. También en el Río Tula, el cual pasa por los DR003 y DR100, al igual que la presa Endhó. Las presas Vicente Aguirre, Debodhe y Rojo Gómez en el DR100. En el DR112 se derrama en la presa El Refugio. Estos cuerpos de agua se encuentran actualmente contaminado, por lo cual es un impacto negativo, ya que el descarga de agua residual es constante. Sin embargo, el cuerpo de agua más contaminado es el Río Tula a la altura del DR003. Este río al llegar al DR100 tiene un efecto de dilución y menores cargas de contaminantes. Los valores obtenidos de la calidad del agua al final del valle (DR100) son similares a los que se presentan a la salida de una planta de tratamiento de agua de nivel secundario y con nitrificación parcial.

Se ha comprobado que los embalses, en este caso las presas antes mencionadas, contienen también una menor cantidad de microorganismos patógenos (Cifuentes, 1994). Por lo anterior, la contaminación de los cuerpos de agua representa un riesgo ambiental, ya que es poco probable que pueda desarrollarse vida acuática en estos. También existen amenazas sanitarias que pueden provocar enfermedades entéricas al tener contacto con el agua del Río Tula y un riesgo menor de padecer este tipo de enfermedades al tener contacto con el agua de los embalses, en este caso las presas.

B) Sanitarios

Calidad del agua no apta para consumo humano a pesar del SAT. (-)

Al llevarse a cabo el SAT, el agua residual que se infiltra a través del SAT ha formado fuentes de abastecimiento gracias a la recarga, como son los manantiales, pozos y norias. Estas fuentes de abastecimiento han sido utilizadas por la población del Valle del Mezquital para abastecer su demanda de agua. Aunque, se han realizado estudios (Lesser C., 2011) que demuestran que el acuífero contiene concentraciones de metales pesados como el arsénico,

así como altas concentraciones de sodio, las cuales no son aptas para consumo humano. Algunos microorganismos llegan al acuífero, se han encontrado hasta 4.6 UFC/100 mL de coliformes fecales en el acuífero profundo en temporada de estiaje, las cuales no se deben propiamente al agua residual sin tratar. Es importante mencionar que las comunidades del Valle ingresan el drenaje a algunos cuerpos de agua generando una recontaminación, la cual es preocupante en la medida en la que el agua de los acuíferos sea para uso y consumo humano. Esto es un impacto negativo para la salud de la población.

C) Económicos

Satisfacción de la demanda de agua a partir de nuevas fuentes de abastecimiento y reducción de costos por potabilización. (+)

Como se mencionó en el inciso anterior, gracias a las fuentes de abastecimiento la una parte de la población del Valle ha satisfecho su demanda de agua por medio de los manantiales, pozos y norias. Sin embargo, estas fuentes de abastecimiento utilizan la cloración como único método de potabilización sin considerar la presencia de sales y metales pesados, por lo cual en este sentido han reducido los costos de las instituciones gubernamentales de potabilizar estas fuentes de abastecimiento, así como el pago de la población por un servicio de agua potabilizada. Se considera que esta situación es un impacto positivo económicamente tanto para las instituciones como para la población por la reducción de costos de potabilización (\$74 de cuota mínima).

3.5.3.- Comparación de los índices de agua residual sin tratar con el agua residual tratada por la PTAR Atotonilco y la remoción del SAT.

A manera de resumen de la presente investigación se hizo una comparación entre los índices de calidad del agua residual sin tratar, para el agua residual tratada y el agua del acuífero. La finalidad fue verificar como mejora la calidad del agua de manera natural por medio del SAT y como mejorará al recibir tratamiento biológico y fisicoquímico. En la Tabla 24 se muestran estos índices en las diferentes matrices de microorganismos, materia orgánica, nutrientes, metales pesados y sales.

a) Microorganismos

En la Tabla 24 se puede observar que el parámetro de coliformes fecales en agua residual sin tratar tiene un índice máximo de 2.5, de acuerdo con este valor, pueden haber concentraciones máximas de 7 unidades logarítmicas y el LMP es 3. Una vez llevado a cabo el SAT, en el acuífero los índices son de 4.6 y 1.1, aunque estos valores corresponden a unidades logarítmicas, ya que la NOM-127-SSA1-1994 establece que el LMP es cero. El tratamiento llevado a cabo por la PTAR provocará que la carga de coliformes fecales al final del proceso de tratamiento tenga un índice máximo de 0.025. En relación con los huevos de helminto, en el agua residual sin tratar tiene un índice de 21.9 mientras que al llevarse a cabo el SAT, los huevos de helminto se reducen a un índice de 8; y, por medio de la PTAR la carga se reducirá, obteniendo un índice de 0.02.

El SAT reduce en un 35% el parámetro de coliformes fecales al llevarse a cabo el tratamiento natural por medio del suelo, mientras que el tratamiento reduce el 99% de este tipo de microorganismos. La reducción de huevos de helminto por medio del SAT es significativa ya que este parámetro se reduce en un 62%, mientras que, con el tratamiento de la PTAR, este se reducirá en un 99%, por lo cual se minimizará aún más la presencia de estos patógenos. La reducción de microorganismos disminuye el riesgo de padecer enfermedades entéricas por E.coli y Ascaris lumbricoides, las cuales son las principales especies patógenas que se han encontrado en el agua residual sin tratar, el acuífero y los suelos del Valle del Mezquital.

b) Materia orgánica

En cuanto a la materia orgánica, en el agua residual sin tratar los SST tienen índices de hasta 8.08, los cuales no han sido comprobados por medio del SAT, pero la eficiencia de la PTAR provocará que lleguen a 0.88 por medio del tratamiento fisicoquímico. La materia orgánica, benéfica para el suelo y los cultivos²¹ se reducirá de tal manera que puede llegar a ser insuficiente y se requerirá de un mayor uso de fertilizantes en el Valle del Mezquital. En cuanto a la DBO₅, en esta investigación no se comprobó su remoción por medio del SAT, pero si se hizo para la PTAR, y por medio de este tratamiento la DBO₅ pasará de un índice de 3.8 a 0.37.

c) Nutrientes

El nitrógeno tiene un índice de 1.46 el cual se incrementa al llegar al acuífero profundo el índice se incrementa a 2.5, lo cual se debe al SAT y al ciclo del nitrógeno, donde el nitrógeno amoniacal se convierte en nitritos y nitratos. Al llevarse a cabo el tratamiento el tratamiento de la PTAR el índice se reducirá a 0.34, lo cual derivará en un requerimiento de este nutriente para la agricultura. El fósforo tiene un índice de 6.8 en agua residual sin tratar, aunque no fue posible su evaluación en el acuífero, el índice se reduce a 2.2 por medio del tratamiento llevado a cabo por la PTAR.

d) Metales pesados

En cuanto a los metales pesados, el manganeso, hierro, aluminio, cromo y cobre disminuyen por medio del SAT hasta en un 82%, el índice de manganeso, por ejemplo, se reduce de 1.79 a 0.15. Se puede observar también que, por medio del tratamiento de la PTAR, estos se reducen hasta en un 90%, por ejemplo, el cromo se reduce de 0.55 a 0.37. La reducción de metales pesados es muy importante ya que se debe evitar a toda costa que haya una contaminación de suelos y acuífero. También, esta contaminación no debe interferir con la salud de la población, ya que el contacto con este tipo de metales puede derivar en el

²¹ El agua residual sin tratar proporciona un porcentaje mayor de materia orgánica en el tipo de suelo feozem, comparado con el mismo tipo de suelo en otras zonas y los requerimientos de fertilidad del mismo para la agricultura (5.7% a 0.7%).

mediano y largo plazo en enfermedades renales que son muy costosas tanto para el sector salud como para el paciente.

e) Salinidad

La salinidad es un tópico peculiar, se puede observar que el índice más elevado en agua residual sin tratar es de son los que corresponden a los SDT el cual es 1123, al llevarse a cabo el SAT, se este índice se incrementa y llega a 2235. Al llevarse a cabo el tratamiento, teóricamente se remueve hasta el 99% y se llega a un índice de 1.12, pero este resultado será tentativo, ya que en temporada de lluvia se utilizará cloruro férrico como coagulante. Lo anterior, podría suponer un incremento de sales en el líquido del efluente que se depositará en el suelo posterior al tratamiento. Será importante verificar el comportamiento de la salinidad en el mediano y largo plazo al entrar en operación la PTAR, ya que esto podrá tener efectos adversos en los suelos del Valle y limitar la productividad agrícola.

Tabla 24. Índices de calidad del agua sin tratar (ARC), acuífero y agua residual tratada

GRUPO	PARÁMETRO	ARC ESTIAJE	ARC LLUVIA	TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO	TRATAMIENTO BIOLÓGICO	ACUÍFERO SOMERO LLUVIA	ACUÍFERO PROFUNDO ESTIAJE	ACUÍFERO PROFUNDO LLUVIA
MCO (*)	<i>Coliformes fecales</i>	2.5	2.28	0.022	0.025		4.6	1.1
	<i>Huevos de Helminto</i>	21.9	20.2	0.02	0.0219	8		
M.O(**)	<i>SST</i>	7.35	8.08	0.88	0.073			
	<i>DBO5</i>	3.8	1.52	0.22	0.37			
Nutrientes	<i>Nitritos</i>					0.1	0.01	1.27
	<i>Nitrógeno</i>	1.13	1.46	1.04	0.34	10.25		2.55
	<i>Fósforo</i>	6.8	2.35	2.2	0.22			
Metales pesados	<i>Plomo</i>	0.14			0.139			
	<i>Boro</i>	2.2	0.91	0.026	1.57			
	<i>Manganeso</i>	1.08	1.79	0.89	0.55		0.09	0.15
	<i>Hierro</i>	0.75	1.83			0.01	0.41	0.35
	<i>Aluminio</i>	1.7	2.7			0.0064		0.13
	<i>Níquel</i>	0.55	0.29	0.021	0.036			
	<i>Arsénico</i>					0.04		0.42
	<i>Bario</i>					0.16		0.54
	<i>Zinc</i>	0.26	0.3	0.01	0.065	0.0901	0.05	3.47
	<i>Cromo</i>	0.58	0.38	0.15	0.271			0.015
	<i>Cobre</i>	0.59	0.3	0.04	0.29	0.05		0.043
<i>Cianuro</i>	3.88	0.46	0.124	0.44				
Sales	<i>Fluoruro</i>	1.5	0.45	0.09	0.07			
	<i>Sulfato</i>	9.9			0.49			
	<i>SDT</i>	890	1123	1.12	0.89	1296	283	2235
	<i>Cloruro</i>						3.07	0.73
	<i>Sodio</i>					1.4875	2.149	2.257

(*) MCO: Microorganismos, (**) M.O: Materia orgánica.

3.5.4.- Estimación de algunos costos y beneficios monetarios en los rubros ambiental, sanitario y económico del tratamiento del agua residual en el Valle del Mezquital

Se realizó un análisis monetario sobre algunos costos y beneficios del tratamiento del agua residual por medio de la PTAR en los rubros ambiental, sanitario y económico. En cuanto al rubro ambiental, de acuerdo con la memoria documental de la PTAR elaborada por CONAGUA, el costo que tendrá tratar un m³ (1000 litros) de este líquido será de \$1.0182. este costo será mucho menor que la tarifa por un m³ de agua potabilizada en la zona del Valle del Mezquital, la cual es de \$9.25 (ver Tabla 25). Por estas razones, el saneamiento tendrá un costo menor que el costo que se tiene por potabilizar el servicio de agua.

Se reducirá la contaminación de 914,544,000 m³ de agua al año los cuales además de servir para riego se vierten en cuerpos de agua como el Río Tula, la presa Endhó y la presa Requena. El costo total del tratamiento de este volumen de agua será de \$931,188,701, este costo es cerca de nueve veces menos de lo que se pagaría por agua potabilizada y será asumido por la PTAR, la población del Valle quedará exenta de pagar por este servicio, por lo cual se verá beneficiada.

Además, presumiblemente gracias a la recarga de 25 m³/s, la cual ha dado origen a manantiales, pozos y norias, se estima que un tercio de la población, correspondiente a 58,527 hogares en el Valle del Mezquital se beneficia de estas fuentes de abastecimiento. Lo anterior representaría un ahorro en el servicio de agua potable de hasta 6.49 millones de pesos al año por parte de estos hogares. Se puede inferir pertenecen en su mayoría al DR100, ya que en sus municipios brotan la mayoría de manantiales y existen una gran cantidad de pozos (II, 2017).

Tabla 25. Costos y beneficios monetarios en materia ambiental del tratamiento del agua residual

Rubro	Coto del agua residual tratada (\$/m ³)	Millones de m ³ tratados anualmente por la PTAR	Costo total del agua residual tratada (millones de \$)	Recarga del acuífero mediante el SAT	Hogares beneficiados por la recarga	Precio del agua potabilizada (\$/m ³)	Ahorro en agua potable (millones de \$)
AMBIENTAL	1.01	914.5	931.1	25 m ³ /s	58527	9.25	6.49

Elaboración propia con base en CONAGUA y CAASIM (Comisión de agua y alcantarillado de sistemas intermunicipales, Hidalgo).

En cuanto al rubro de salud, se ha mencionado que el problema principal son las enfermedades entéricas por el contacto con el agua residual sin tratar, las cuales tienen una tasa de morbilidad de 21.1% (Tabla 26) con respecto al número de casos totales en el Estado de Hidalgo. En el Valle del Mezquital solo el 33.4% de la población tiene acceso a los servicios de salud por medio de seguridad social, el resto atiende su salud en servicios privados, aunado a esto el 58.5% de la población se encuentra dentro de algún tipo de pobreza. De acuerdo con las cifras anteriores, los hogares de esta zona invierten actualmente \$121,506,065 en el tratamiento de enfermedades entéricas.

La reducción de coliformes fecales y huevos de helminto en el flujo tratado anualmente será en un 99.9%, lo cual implicaría una reducción de costos en este tipo de padecimientos en \$121,506,065. Por lo anterior, los beneficios se traducirían en que anualmente los hogares del Valle del Mezquital invirtieran \$121,627 en el tratamiento de enfermedades entéricas. La tasa de morbilidad se reduciría sustancialmente a 0.02%, por lo cual las enfermedades entéricas ya no representarían un problema sustancial de salud en esta zona.

Bajo el supuesto de que las enfermedades crónicas asociadas a metales pesados están relacionadas con la práctica de riego con agua residual se tiene que la tasa de mortalidad es de 36.7%. La enfermedad más costosa es la insuficiencia renal, la cual genera un costo anual por el total de casos en el Valle del Mezquital de \$241,250,000. El tratamiento llevado a cabo por la PTAR reducirá los costos en \$176,112,500, por lo cual el sector salud y los hogares invertirán en este tipo de tratamiento \$65,137,500 anualmente. La tasa de mortalidad se reducirá al 9%, lo cual será benéfico de calidad de vida en esta zona.

Tabla 26. Costos y beneficios monetarios en materia de salud del tratamiento del agua residual

RUBRO	Padecimientos	Tasa de morbilidad (a) y tasa de mortalidad (b) actuales	COSTOS ACTUALES (\$) (sin tratamiento)	↑ O ↓ DE COSTOS (\$) (con tratamiento)	↑ O ↓ DE BENEFICIOS (\$) (con tratamiento)	↑ O ↓ de las tasas de morbilidad (a) y mortalidad (b)
SANITARIO	Enfermedades entéricas (a)	21.1%	121,627,693	↓121,506,065.6	↑121627.6	0.02%
	Enfermedades crónicas asociadas a metales pesados (b)	36.7%	241,250,000	↓176,112,500	↑65,137,500	9%

Elaboración propia con datos de SIIEH, Cámara de diputados e INEGI. Especificaciones: ↑: Incremento; ↓:disminución; a: morbilidad; b: mortalidad.

En el rubro productivo, los insumos que el agua residual sin tratar aporta al suelo son materia orgánica y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. El suelo de tipo feozem, el cual es el más estudiado en el Valle del Mezquital requiere de 0.7% de materia orgánica, sin embargo, el agua residual aporta el 5.7%, el cual es 714% adicional al requerimiento de materia orgánica. En cuanto a los nutrientes el agua residual sin tratar aporta 61% adicional al requerimiento de kg/ha de nitrógeno y 86% para el fósforo (Tabla 27). A pesar de que el agua residual cubre los requerimientos de materia orgánica y algunos nutrientes, estos no se aprovechan del todo, ya que se lleva a cabo el riego por inundación. El riego por inundación implica desperdicio de agua, por lo cual los agricultores no dependen al cien por ciento del agua residual y requieren invertir en fertilizantes.

De acuerdo con comunicación personal, los agricultores refieren invertir en promedio \$4000 anuales en fertilizante gracias a la aportación de materia orgánica y nutrientes contenidos en el agua residual. Al llevarse a cabo el tratamiento del agua residual se reducirán los parámetros de materia orgánica y nutrientes en la misma, lo cual podría incrementar la inversión de los agricultores en fertilizantes. La reducción de estos parámetros incrementará

la inversión en fertilizantes en promedio en la cantidad de \$6480, una cantidad que no es muy elevada comparada con la inversión antes del tratamiento.

Tabla 27. Costos y beneficios monetarios en materia económica del tratamiento de agua residual

RUBRO	Insumos aportados por el agua residual sin tratar	Requerimiento (**)	Porcentaje de aportación adicional con respecto a los requerimientos	Costos actuales (sin tratamiento) (*)	↑ O ↓ DE COSTOS (con tratamiento)
PRODUCTIVO	Materia orgánica	0.7	714%	\$4,000	\$7,293.20
	Nitrógeno (**)	1071	61%		\$5,666.400
	Fósforo (**)	535.5	86%		
	Total				\$6,480

Elaboración propia con datos de SIIEH, Cámara de diputados e INEGI. Especificaciones: ** kg/ha al año.

Cálculo de elasticidades para salud y productividad

3.6.- Percepción del sistema hídrico productivo por parte de los agricultores del Valle del Mezquital.

A) Resultados obtenidos del sondeo

Tabla 28. Características de los entrevistados

Distrito de Riego	Participantes	No tienen contacto con agua residual
DR 003	12	6
DR 100	8	2
DR 112	9	3
Total/Promedio (*)	29	37.9(*)

(*) Promedio de entrevistados que no tienen contacto con agua residual sin tratar.

A1) Productividad agrícola

La Tabla 28 muestra los resultados del sondeo, la mayoría de los agricultores son propietarios de las parcelas (24 de 29), por lo cual ellos son los encargados de lo que concierne a la siembra desde la preparación de las tierras, riego y fertilización. Algunos agricultores se dedican aparte de la agricultura a otras actividades como la construcción, ganadería o son obreros (19 de 29), ya que dicen complementar sus ingresos con estas actividades. Los agricultores que tienen contacto con agua residual sin tratar (18 de 18) siembran solo forrajes como alfalfa, maíz y cebada en el ciclo de primavera-verano y en otoño-invierno siembran avena; también, algunos de ellos siembran legumbres, hortalizas y otro tipo de cultivos (4 de 18). Mientras que, algunos de los que no tienen contacto con este tipo de líquido siembran forrajes (8 de 11) en menor cantidad que otros cultivos, ya que la mayoría (10 de 11) siembran legumbres como el brócoli, coliflor, chile, jitomate y nabo (Tabla 29).

En relación con la recepción de agua, algunos de los agricultores que tienen contacto con agua residual sin tratar reciben agua residual totalmente cruda, (12 de 18)

específicamente los de los DR003 y DR112, mientras que los del DR100 (6 de 18) reciben agua residual mezclada con agua del Río Tula, Canal Xhotó y retornos agrícolas. Todos los entrevistados que no tienen contacto con agua residual sin tratar cruda (11 de 11) riegan sus cultivos con agua mezclada o de pozo, manantial, albercas o presas que no contienen agua residual. En cuanto al empleo de fertilizantes y pesticidas, algunos de los agricultores que tienen contacto con agua residual sin tratar totalmente cruda los emplean (8 de 18), ya que refieren que este recurso aporta nutrientes, pero no en su totalidad. Por otro lado, aquellos que no tienen contacto, requieren una mayor cantidad de fertilizantes y pesticidas, por lo cual todos refieren utilizarlos (11 de 11) (Tabla 29).

A2) Percepción de riesgo sanitario

La segunda sección de interés de las entrevistas fue la percepción de riesgo sanitario. Muy pocos agricultores que tienen contacto con el agua residual sin tratar (2 de 18) considera que sembrar con este tipo de recurso implica algún riesgo. Mientras que la mayoría de los que no tienen contacto con este recurso (9 de 11) consideran que existe un riesgo de enfermarse por la manipulación de este recurso. En relación con la preferencia agua residual/agua de pozo, todos los entrevistados que tienen contacto con agua residual prefieren este tipo de recurso al agua de pozo (18 de 18), mientras que muy pocos de los que no tienen contacto (2 de 11) la preferiría usar por el aporte de nutrientes (Tabla 29).

A3) Saneamiento

El tercer tópico relevante de las entrevistas fue el relacionado con el saneamiento de la zona por medio de la PTAR. De acuerdo con este tópico, la mayoría de los entrevistados que tienen contacto con el agua residual sin tratar tienen conocimiento del megaproyecto de la PTAR (16 de 18). Mientras que de aquellos que no tienen contacto con el agua residual, pocos conocen sobre esta nueva iniciativa (5 de 11), algunas personas no saben sobre los alcances y objetivos de la PTAR. Una minoría de las personas entrevistada que tienen contacto con el agua residual (2 de 18) considera que la PTAR Atotonilco será de gran ayuda para el saneamiento de la zona; mientras que la mayoría de los que no tienen contacto con el agua residual (9 de 11) consideran lo mismo. (Tabla 29)

Tabla 29. Resultados de las entrevistas semiestructuradas

No. de pregunta	Productividad agrícola	Tienen contacto (%) / num. de entrevistados (18)	No tienen contacto (%) / núm. de entrevistados (11)
1	Hectáreas propias	88.9 (16)	72.7 (8)
2	Se dedica a otras actividades aparte de la agricultura (construcción, ganadería, obrero)	66.7 (12)	63.6 (7)
3	Siembra forrajes	100 (18)	72.7 (8)
4	Siembra legumbres, hortalizas u otro tipo de cultivo que no es forraje (rábano, brócoli, coliflor, chile, jitomate, nabo).	22.2 (4)	90.9 (10)
5	Recibe agua residual sin tratar	66.7 (12)	0 (0)
6	Recibe agua mezclada o de retorno agrícola	33.3 (6)	0 (0)
7	Riega con agua mezclada o de pozo, manantial, alberca o presa que no contiene agua residual, pipas de agua potable o temporal	0 (0)	100 (11)
8	Recurrencia del uso de fertilizantes y pesticidas	44.4 (8)	100 (11)
	Percepción de riesgo sanitario		
9	Considera que sembrar con agua residual representa un riesgo para la salud	11.1 (2)	81.8 (9)
10	Prefiere agua el residual al agua de pozo	100 (18)	18.2 (2)
	Saneamiento		
11	Tiene conocimiento de la PTAR Atotonilco	88.9 (16)	45.5 (5)
12	Piensa que la PTAR será de gran ayuda para saneamiento de la zona	11.1 (2)	81.8 (9)

3.7.- Discusión

Costos y beneficios ambientales, sanitarios y productivos percibidos y reales del tratamiento de agua residual

La percepción sobre el tratamiento del agua residual y los datos reales obtenidos en la investigación presentan diferencias entre sí. El comportamiento humano en diversas ocasiones no es racional, como es el caso de empleo de agua residual sin tratar en la agricultura del Valle del Mezquital, práctica que ha ocasionado amenazas sanitarias; aunque, de no llevarse a cabo, la agricultura no sería una de las principales actividades económicas de esta zona. Actualmente con la implementación de la PTAR surgen diferentes preguntas desde los diversos actores involucrados; agricultores, población aledaña e instituciones sobre los costos y beneficios del tratamiento. Lo anterior, ya que al ser la planta de tratamiento más grande de América Latina se tienen altas expectativas para el saneamiento integral de una zona contaminada por 97 años de riego con agua residual sin tratar. A continuación, se presenta el contraste entre los costos y beneficios percibidos y reales del tratamiento de agua residual en el Valle del Mezquital.

Ambientales

Al llevar a cabo la aplicación de entrevistas, los agricultores que no tienen contacto con el agua residual son más conscientes de que es necesario el saneamiento de la zona por la contaminación potencial. La mayoría de los agricultores entrevistados que tienen contacto con el agua residual considera que el saneamiento podría interferir con la productividad de sus tierras, por lo cual desde su perspectiva no sería tan benéfico. La percepción sobre el saneamiento de la zona por parte de los agricultores que tienen contacto con el agua residual es distinta a lo que arrojan los datos reales sobre los costos y beneficios que esto traerá.

El tratamiento de agua residual por medio de la PTAR reduciría la contaminación ambiental de la zona del Valle del Mezquital en un 67% al tratar ese porcentaje del flujo de agua residual que arriba a la zona. Este porcentaje de contaminación se reduciría asimismo en el Río Tula, la presa Endhó y la presa Requena, cuerpos de agua naturales y artificiales que han sido afectados por el vertimiento de agua residual durante 97 años. El flujo tratado de \$914.5 millones de m³ tendría un costo monetario de \$931.1 millones de pesos anuales, el cuál sería asumido en su totalidad por la PTAR, ya que la población del Valle del Mezquital

no pagará algún tipo de impuesto por este saneamiento. La PTAR fue creada con la finalidad de asumir el costo de contaminar el Valle del Mezquital por parte del Valle de México, en este sentido se cumple la premisa de “el que contamina paga”.

Al no ser tratado el 100% del flujo que se descarga anualmente en el Valle del Mezquital habría un 33% de flujo no tratado del cual se desconoce su gestión, lo cual podría tener consecuencias ambientales que deberán evaluarse. A pesar de que solo el 67% del agua residual será tratada, en este porcentaje de saneamiento los beneficios serán mayores a los costos. El costo por m³ tratado será mucho más barato que la tarifa mínima que se paga en el Estado de Hidalgo por m³ de agua potable y además la población no pagará por el servicio de tratamiento.

Adicionalmente, en el Valle del Mezquital se lleva a cabo una recarga en el acuífero por medio del SAT, específicamente del proceso de infiltración de 25 m³/s. Lo anterior ha generado nuevas fuentes de abastecimiento como manantiales, pozos y norias y ha provocado que la población de algunos municipios del Valle del Mezquital (en su mayoría los del DR100, municipios donde brotan la mayoría de los manantiales) (II, 2017) utilicen este recurso hídrico para uso y consumo (Jiménez C. B. E., 2004). Por lo anterior se podría inferir que aproximadamente un tercio de la población del Valle del Mezquital podría presumiblemente no hacer uso del servicio de agua potable. De esta manera, se puede estimar que existiría un ahorro de la población de \$6.49 millones de pesos, lo cual sería un gran beneficio de la recarga.

Sanitarios

El tema de salud es de vasta importancia para el saneamiento de la zona, ya que la población ha estado expuesta por 97 años a consecuencia de empleo de agua residual en agricultura. En lo relativo a la percepción del riesgo sanitario, la mayoría de los agricultores entrevistados que tienen contacto con el agua residual sin tratar refiere que incluso “se han vuelto inmunes a las enfermedades” por el largo periodo que llevan empleando este recurso en la agricultura. La mayoría de los entrevistados que no tienen contacto con el agua residual sin tratar considera que el empleo de agua residual sin tratar en la agricultura representa riesgos para la salud. Las opiniones de ambos grupos de agricultores son contrastantes, y

aquellos que tienen contacto con este tipo de agua le resta importancia al riesgo que implica la exposición tanto de ellos como del resto de la población aledaña.

Como ya se mencionó anteriormente, el 67% del flujo anual que se descarga en el Valle del Mezquital será tratado. Dentro de este flujo tratado se reduciría el 99.9% de coliformes fecales y huevos de helminto, microorganismos responsables de las amenazas sanitarias por enfermedades entéricas por *E.coli* y *Ascaris lumbricoides*. Este tipo de enfermedades tienen una tasa de morbilidad del 21.1% en el Valle del Mezquital con respecto al número total de casos que se presentan en el Estado de Hidalgo y generan costos en salud para la población de esta zona. En los 27 municipios del Valle del Mezquital el 33.4% de la población tiene acceso a servicio de salud por medio de seguridad social, el resto asume los costos de salud por medio de servicios privados (SIIEH, 2016).

Los costos que se presume generan las enfermedades entéricas en el Valle del Mezquital ascienden a \$121.6 millones de pesos, cantidad que es invertida por los hogares de esta zona. Al reducirse el 99.9% de los coliformes fecales y huevos de helminto en el flujo tratado se reducirían también los costos que los hogares invertirían en este tipo de padecimientos, los cuales serían de \$121,627. Estos beneficios se verían reflejados solo con respecto al 67% del flujo tratado anualmente, los costos que generará la morbilidad por la exposición al flujo no tratado de 362.6 millones de m³anualmente deberán ser evaluados.

Adicionalmente se puede inferir que puede haber una amenaza por enfermedades asociadas a la presencia de metales pesados como la Insuficiencia Renal Crónica (IRC), la cual tiene una tasa alta de mortalidad del 36.7%. en el Valle del Mezquital. la IRC generó en el último año 965 defunciones y es altamente costosa al ser un padecimiento crónico, tanto para el sector salud como para los hogares del Valle del Mezquital, ya que genera un costo de \$250,000 por paciente anualmente.

La reducción de metales pesados por el tratamiento tendría un promedio de 73% anualmente dentro del flujo tratado, esto podría beneficiar a la población al reducirse la amenaza por exposición, por lo cual la tasa de mortalidad podría disminuir de un 36.7% hasta un 9%. El beneficio se reflejaría también en el gasto del sector salud y de la población asegurada y no asegurada, ya que en promedio habría un ahorro de \$176.1 millones de pesos y la inversión total en salud sería de \$65.1 millones de pesos.

Los costos y beneficios anteriores se verían reflejados solamente para el flujo anual de 931.5 millones de m³ que se presume serán tratados por la PTAR. Es importante mencionar que al desconocerse la gestión de este flujo se desconocen las implicaciones en la salud de la población que esto tendría y que municipios del Valle estarán expuestos. Se desconoce lo que podría ocurrir con respecto a las amenazas por enfermedades entéricas e IRC en el flujo no tratado de 362.6 millones de m³ (correspondientes al 33% del flujo total anual) si estos contaminantes se vertieran en el suelo. El flujo no tratado depositaría en el suelo una concentración anual de hasta 7 unidades logarítmicas de coliformes fecales y de 181.2 HH/ha, así como 74.05 kg/ha de metales pesados los cuales estarían por encima de los LMP establecidos por las normativas nacionales, por lo que se podrían considerar como una amenaza sanitaria.

Productivos

En cuanto a la productividad del Valle del Mezquital, los agricultores entrevistados tienen diferentes percepciones en lo relativo al empleo y no empleo de agua residual de agua residual sin tratar en la agricultura. Los agricultores que tienen contacto con agua residual sin tratar la consideran un recurso altamente necesario para su producción a tal grado que la mayoría la prefiere por encima del agua de pozo u otro tipo de agua con una mejor calidad. Por otro lado, aquellos agricultores que no tienen contacto con el agua residual sin tratar comentan que prefieren un “agua limpia” ya que sembrar con agua residual está prohibido para algunos cultivos que son redituables en el mercado como las legumbres, además de que provoca enfermedades.

En lo relacionado con el saneamiento, los agricultores que tienen contacto con este líquido argumentan que el agua residual tratada no aportará suficientes nutrientes y que deberán invertir una mayor cantidad monetaria en fertilizantes, lo cual podría disminuir la rentabilidad de la actividad agrícola. También tienen cierta incertidumbre sobre el precio por riego del agua residual tratada y el flujo que les será proporcionado, ya que al momento de la entrevista todos refirieron que el riego tenía un precio de \$10. Por otro lado, los agricultores que no tienen contacto con el agua residual opinan que el saneamiento proveerá agua de mejor calidad con la que se podrán sembrar legumbres y hortalizas que son más redituables en el mercado, además que habrá un menor riesgo de enfermar. Para estos agricultores que

riegan con agua mezclada, proveniente de algunas presas de agua residual o pozos, el riego tiene un precio que oscila en los \$25.

El agua residual sin tratar proporciona porcentajes adicionales de materia orgánica y nutrientes superiores a los requerimientos de fertilidad, los cuales en promedio son de 714% y 73.5% respectivamente. Aunque este líquido proporciona porcentajes adicionales de materia orgánica y nutrientes, los agricultores entrevistados que tienen 4 hectáreas refieren invertir anualmente \$4000 en fertilizante. Lo anterior se puede deber a la práctica de riego por inundación y al flujo de agua que no es aprovechado por derrame en los canales de riego. Los datos reales que respectan a la productividad agrícola posterior al tratamiento estimaron que habría una reducción promedio del 82.3% de materia orgánica y del 41.6% de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Con base en los porcentajes anteriores, la inversión en fertilizantes para los usuarios que cuentan con 4 hectáreas se incrementaría hasta \$6,480.

Actualmente, la PTAR se encuentra en pruebas, razón por la cual no se puede conocer la situación de los agricultores con respecto al tratamiento del agua. También se desconoce si el precio del agua residual tratada por riego se incrementará y en qué proporción, así como el volumen de agua que recibirá cada usuario. Adicionalmente y como ya se ha mencionado, hasta ahora se desconoce la gestión del 33% del flujo de agua residual que no tratará la planta, el cual contendría una cantidad considerable de patógenos y metales pesados, pero también materia orgánica y nutrientes. Este flujo aportaría 7031 kg/ha de parámetros de materia orgánica y 1305 kg/ha de nutrientes, los cuales y se tendría que buscar una manera de gestionar este flujo de agua residual sin tratar para que no ocasione amenazas sanitarias y valorar las posibilidades de ser utilizado por los agricultores. En la figura 36 se pueden observar los costos y beneficios productivos, de salud y ambientales del sistema hídrico-productivo con y sin PTAR.

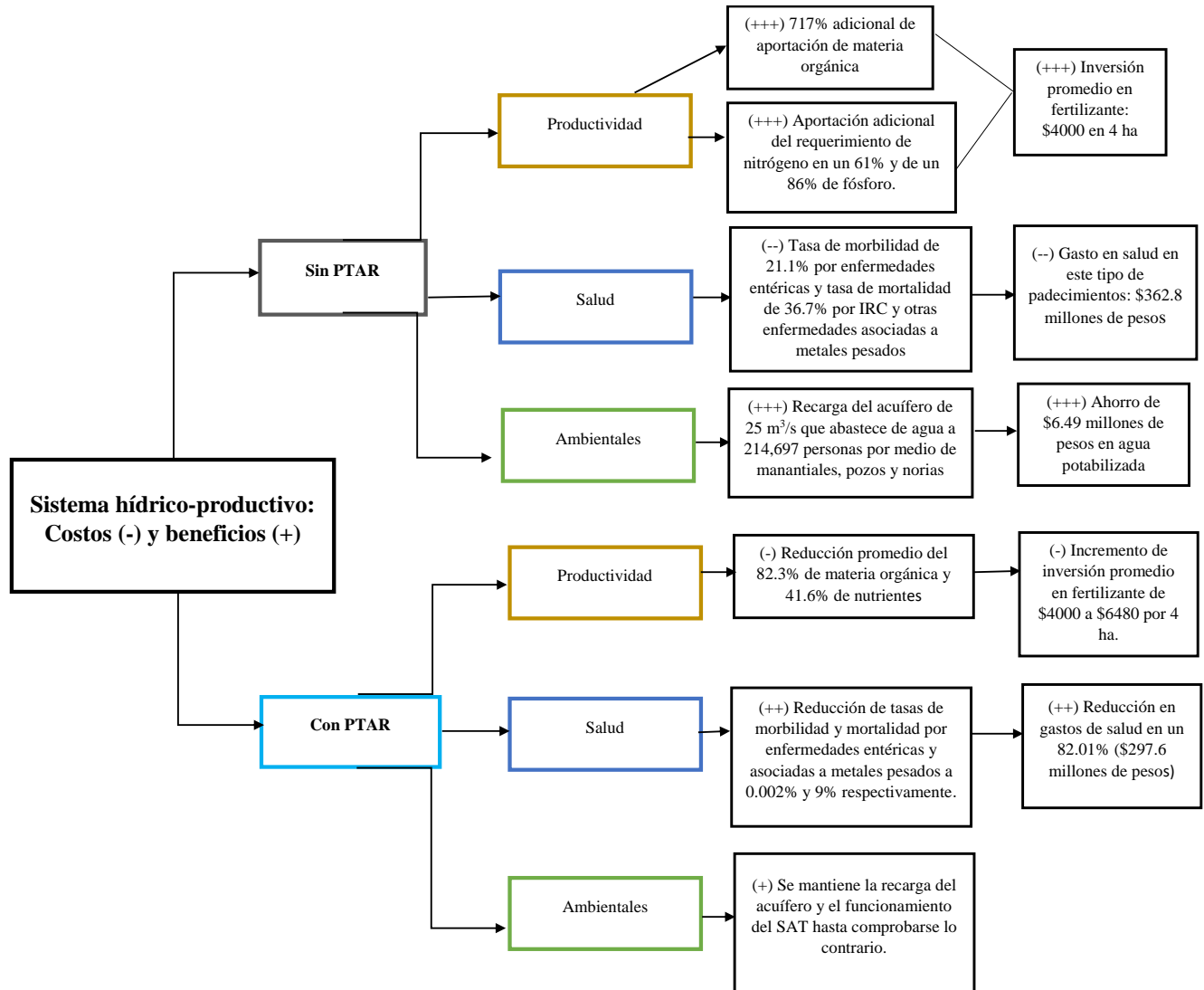


Figura 36. Diagrama de los costos y beneficios del sistema hídrico-productivo del Valle del Mezquital con y sin PTAR

Para finalizar la discusión, se elaboraron elasticidades con base en esta estimación utilizada en economía, las cuales determinaron que la variación porcentual de porcentaje de remoción promedio con respecto al porcentaje del flujo tratado anualmente (67%) será de 0.40 para los costos en materia de salud y de 0.61 para la materia orgánica y los nutrientes. Con base en la teoría económica relacionada con lo que una elasticidad representa, los datos obtenidos para ambos tipos de costos son “inelásticos”; es decir, los porcentajes de remoción no son proporcionales al porcentaje del flujo tratado.

Con base en lo anterior, los costos de salud por enfermedades entéricas e insuficiencia renal se reducirían de manera real en un 40%, lo cual representaría un ahorro de \$145.2 millones de pesos al año en salud. En cuanto a la aportación de materia orgánica y nutrientes ambos se reducirían en promedio en un 61%, por lo cual la inversión anual en fertilizante ascendería a \$6440 por 4 hectáreas. Los datos no varían mucho con respecto a los datos estimados para el flujo anual tratado y los porcentajes de remoción teórica.

Rubro	Parámetro	Porcentaje de remoción promedio	Elasticidad con base en el porcentaje de remoción anual en el flujo tratado (67%)
SALUD	Coliformes fecales	99%	0.40
	Metales pesados	73%	
PRODUCTIVIDAD	Materia orgánica	82.30%	0.61
	Nutrientes	41.60%	

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- Conclusiones

En un balance final, el reúso de agua residual sin tratar en el Valle del Mezquital ha ocasionado diversos impactos ambientales, económicos y sociales. Algunos de los impactos más relevantes son el impulso de la productividad agrícola en una zona semiárida y la recarga del acuífero que dio origen a manantiales, pozos y norias que abastecen aproximadamente a un tercio de la población de la zona, ambos impactos se consideran positivos. Aunque, también existen impactos negativos como el amenazas sanitarias por la carga de patógenos y contaminantes que contiene este líquido, así como la contaminación de cuerpos de agua naturales y embalses artificiales como el Río Tula, la presa Endhó y la presa Requena. Por este tipo de impactos se podría considerar al sistema hídrico-productivo como insostenible, ya que ha beneficiado a la agricultura y a la economía de la zona, pero ha dañado al medio ambiente y a la salud de la población.

El Gobierno Federal impulsó la construcción del megaproyecto de la PTAR Atotonilco por medio de recursos públicos y privados, el cual es ambiciosamente el proyecto de saneamiento más grande de América Latina con muy altas expectativas. Sin embargo, tras un análisis detallado de la eliminación de 23 parámetros y las implicaciones ambientales, sanitarias y productivas que esto ocasionará. Se determinó que la PTAR solo removerá el 67% del flujo que arriba de manera anual al Valle del Mezquital. Por lo anterior, habrá un flujo que representa el 33% del total y del cual aún se desconoce su gestión, por lo cual el saneamiento del Valle del Mezquital no será integral.

Lo resultados obtenidos de la evaluación de 23 parámetros en el flujo anual tratado de 914.5 millones de m³ seccionados en grupos de materia orgánica, nutrientes, microorganismos, metales pesados y salinidad fueron diversos. Primeramente, al llevarse a cabo el tratamiento se eliminan el 82.3% de materia orgánica y el 41.6% de nutrientes, lo cual podría considerarse un impacto negativo, ya que incrementa los costos en fertilizante de \$4000 por la producción de 4 ha a \$6480. Se desconoce el precio del agua una vez tratada, así como las implicaciones que esto tendría en los costos de producción agrícola.

En cuanto a la eliminación de microorganismos y metales pesados habrá efectos positivos por el tratamiento, los cuales son considerados como beneficios. Al eliminarse el 99.9% de coliformes fecales y huevos de helminto que ocasionan una tasa de morbilidad por enfermedades entéricas de 21.1%, la cual se reduciría a 0.02%. Se eliminarán también en promedio el 73% de metales pesados, lo cual reduciría la mortalidad por IRC y otras enfermedades asociadas a la presencia de estos contaminantes de una tasa de 36.7% a una de 9%. Esta reducción de patógenos y contaminantes tendría un efecto positivo también en la economía de los hogares y en el gasto del gobierno en salud, ya que se reduciría en un 82.01%, pasando de \$361.8 millones de pesos a \$65.2 millones de pesos. Se desconocen los efectos en la salud que podría tener la falta de tratamiento del 33% del flujo anual, ya que no se sabe cómo se llevara a cabo su gestión.

Ambientalmente lo más importante será el saneamiento de los cuerpos de agua, a pesar del tratamiento parcial. El Río Tula y los embalses artificiales como la Presa Endhó y la Presa Requena se verían beneficiados al reducirse los porcentajes ya mencionados de patógenos y contaminantes. Adicionalmente, se infiere que a pesar del tratamiento no habrá una modificación en la recarga por medio de la infiltración, por lo cual las comunidades que se abastecen del acuífero somero y profundo podrán seguir disponiendo de este recurso. Se lograron evaluar cuantitativamente los costos ambientales, sanitarios y económicos del tratamiento de agua residual tratada, aunque no se lograron evaluar los costos y beneficios monetarios anuales del flujo no tratado de 362.6 millones de m³.

Se comprobó que existe una divergencia entre los costos y beneficios reales y los percibidos. Los datos comprueban que el saneamiento por parte de la PTAR será parcial, que las implicaciones productivas no se verán afectadas sustancialmente y que el amenazas sanitarias y el daño ambiental no será reducido en un 100%, sin embargo, los beneficio serán parciales y las condiciones de la zona mejorarán. Mientras tanto, los datos percibidos son aproximaciones con base en la experiencia de los agricultores en el trabajo de sus tierras y lo que el agua residual sin tratar representa para ellos al ser un recurso que es costo-efectivo productivamente.

Por lo anterior el contraste entre ambos tipos de resultados, proporcionó herramientas para lograr los objetivos propuestos en esta investigación de Ciencias de la Sostenibilidad, ya que se logró una interacción con actores involucrados, los agricultores y los jefes de operaciones de los distritos de riego. Se pudieron conjuntar los componentes ambientales, sociales (sanitarios) y económicos (productividad), los cuales son esenciales en una investigación de este tipo. La investigación tuvo un alcance interdisciplinar conjuntando las diferentes recomendaciones de expertos en diversas disciplinas y la interacción con algunos de los actores involucrados. Este trabajo no logró ser transdisciplinario, ya que para cumplir con esa característica se requiere de un proceso que involucre mayor tiempo para investigar e interactuar con más actores.

4.2.- Recomendaciones

Al inferirse que habrá un incremento en la inversión en fertilizantes y que esto podría afectar negativamente en el presupuesto de los agricultores principalmente los del DR003, se recomendaría sembrar legumbres y hortalizas. Lo anterior sería posible con la calidad del agua una vez tratada, además se podría recuperar la inversión al obtener ganancias por cultivos de mayor valor agregado como el chile, el frijol y la calabacita, los cuales se ha comprobado que tienen los PMR más elevados en la zona.

Sería recomendable una gestión sostenible del flujo no tratado anualmente por la PTAR, el cual es de 362.6 millones de m³, ya que se desconocen los efectos que podría tener el verter este flujo directamente en el suelo. Se podría proponer enviar este flujo a los reservorios como son los embalses artificiales, la presa Endhó y la presa Requena. De esta manera, con una sedimentación primaria, el amenazas sanitarias sería menor que verter el agua residual no tratada en el suelo. En el mediano-largo plazo se deben evaluar las implicaciones ambientales y sanitarias y económica que tendría el no gestionar este flujo.

CAPÍTULO 5. REFERENCIAS

- Acosta H., L. K. (2010). *Tesis de Maestría: Biodegradación de contaminantes emergentes en columnas empacadas con suelos del Valle de Tula.*
- Arrow, K. J. (1986). System, Rationality of Self and Others in an Economic. *The Journal of Business, Vol. 59, No. 4, Part 2: The Behavioral Foundations of Economic Theory.*, S385-S399.
- Beck, U. (1992). Risk society, towards a new modernity. *London: Sage Publications.* , 343-350.
- BGS, CNA, & LSHTM. (1998). *Impact of wastewater reuse on groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico.*
- Blumenthal, U. e. (1992). Estudios recientes de epidemiologías probados con las Guías de la calidad microbiológica de la OMS para el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. *COEDE-CIDMA.*
- Burcu ANILAN. (2014). A study of the environmental risk perceptions and environmental awareness levels of high school students. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 1-23.
- C. de Diputados. (2 de septiembre de 2017). *Cámara de Diputados.* Obtenido de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf
- Cámara de Diputados. (12 de Abril de 2017). *Boletín no. 1197.* Obtenido de <http://www5.diputados.gob.mx/index.php/esl/Comunicacion/Boletines/2016/Marzo/28/1197-Imposible-incorporar-insuficiencia-renal-al-Fondo-de-Proteccion-contr-Gastos-Catastroficos-Secretaria-de-Salud>
- CEPIS. (2002). *Sistemas integrados de tratamiento uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y potencial.*
- CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Manual 1: Teoría.*
- Chávez, M., A. C., & Jiménez Cisneros, B. E. (2016). Costos e impactos de los servicios ecosistémicos que el Valle de Tula presenta a la Ciudad de México. *La biodiversidad en la Ciudad de México*, 165-171.
- Cifuentes, E. e. (1994). Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual. *Revista Salud Pública en México.*
- CONAGUA. (enero de 3 de 2012). *Memoria Documental de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco.* Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/Documentos/MEMORIAS%20DOCUMENTALES/Memoria%20Documental%20Planta%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20de%20Atotonilco.pdf>

- CONAGUA. (12 de enero de 2016). *Estadísticas Agrícolas de los distritos de riego 2013-2014*. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/147021/ea2013-2014.pdf>
- CONAGUA. (3 de Febrero de 2016). *Normas oficiales*. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>
- CONAGUA. (13 de Febrero de 2016). *SISTAG-CNA. Sistema Gerencial de Estadísticas Agrícolas e Hidrométricas*. Obtenido de <http://www.edistritos.com/sistag/>
- CONAMA-Gobierno de Chile. (2 de septiembre de 2017). *Tecnología de Lodos Activados*. Obtenido de http://www.sinia.cl/1292/articles-49990_30.pdf
- Diamond, J. (2006). *Colapso*.
- Eibenschutz, R. (1999). *Bases para la Planeación del Desarrollo Urbano en la Ciudad de México. Tomo 1. Economía y Sociedad en la Metrópoli. Tomo 2. Estructura de la Ciudad y su Región*. . Coedición UAM-Xochimilco y M.A. Porrúa.
- Espinosa G., A., Aguilar Medina, M. d., & Mazari H., M. (2010). Cap. 1. Calidad, una limitante más para la disponibilidad del Agua. En C. A. Ibarra, *Calidad del agua: Un enfoque multidisciplinario*.
- Fabre P., D. (2004). *Una mirada al Valle del Mezquital desde los textos*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- FAO. (2013). *Reutilización del agua en Agricultura ¿Beneficios para todos?* Roma, Italia.
- FAO. (4 de Enero de 2017). *Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible*. Obtenido de http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/ba/organic_matter.pdf
- Ffolliot, P. y., Bojórquez Tapia, L. A., & Hernández Narváez, M. (2001). *Natural Resources Management Practices: a Primer, Ames, Iowa*. Iowa State University Press.
- Folke, C. (2013). Capítulo 2. Respecting Planetary Boundaries and Reconnecting to the Biosphere. En Compilación, *The State of the World 2013: Is Sustainability Still Possible? New York: W.W. Norton*. (págs. 19-28). Worldwatch Institute.
- Gobierno del Estado de Hidalgo. (2011). *Resultados del estudio de Diagnóstico Sectorial en el Estado de Hidalgo 2010*.
- González H., R. (2007). Atenuación natural en el acuífero yucateco. *Int. Contaminación Ambiental*.
- INEGI. (12 de Enero de 2016). *Cuentame INEGI*. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=13>

- INEGI. (4 de Marzo de 2017). *Cuenta satélite del sector salud en México*. Obtenido de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825070502.pdf
- INEGI. (23 de Marzo de 2017). *Cuentame INEGI*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/hgo/poblacion/>
- INEGI. (29 de Agosto de 2017). *Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología*. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/EdafIII.pdf>
- Instituto Geográfico Nacional de España. (22 de Octubre de 2017). *Suelos*. Obtenido de http://campus.usal.es/~geografia/PDFsgeografiayensenanzasmedias/Mapasuelos_EspanaIGN.pdf
- Intagri. (20 de Febrero de 2017). Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/suelos/salinidad-de-suelos-problema-de-fertilidad>
- International Plant Institute (IPNI). (15 de Abril de 2017). *Funciones del Fósforo en las plantas*. Obtenido de [http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/7EFD356D05AA06EA05256A31007595F9/\\$file/Funciones+del+Fósforo.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/7EFD356D05AA06EA05256A31007595F9/$file/Funciones+del+Fósforo.pdf)
- Jefes de operaciones de los Distritos de Riego. (21 de Junio de 2016). Percepción del sistema hídrico Productivo en el Valle del Mezquital. (M. G. Hernández, Entrevistador)
- Jiménez C., B. E. (2004). Cap. 2 El reúso intencional y no intencional del agua en el Valle de Tula. En Compilación, *En Agua en México vista desde la Academia* (pp. 33-57). (págs. 33-57). Academia Mezicana de Ciencias.
- Jiménez C., B. E., & Chávez M., A. C. (1998). Removal of helminth eggs in advanced primary treatment with sludge blanket. *Environmental Technology*, 1061-1071.
- Jiménez Cisneros, B. E., & Asano, T. (2008). *Water Reuse: An International survey of current practices, issues and needs*. IWA.
- Jiménez Cisneros, B. E., & Chávez M., A. C. (2011). Cap. 4 Efectos por el empleo de agua residual de la Ciudad de México para riego en el Valle de Tula. En Compilación, *El Colegio del Estado de Hidalgo: Aportes para el desarrollo del Estado de Hidalgo vol. 1* (págs. 91-124). M. A. Porrúa.
- Kaper, J. J. (2004). "Pathogenic Escherichia coli". *Nature Reviews*, 123-140.
- Kates, R. W. (2001). Sustainability Science. *Science*, 641-642.
- Landa-Cansigno, O. (2009). *Tesis. "Adsorción de Escherichia coli, Giardia lamblia y Ascaris lumbricoides en suelos del Valle de Tula"*.
- Lesser C., L. e. (2011). Balance hídrico y calidad del agua en el acuífero del Valle del Mezquital. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 323-336.

- Lubchenco, J. (1998). Entering the Century of the Environment: A New Social Contract for Science. *Science*, 491-497.
- Lüdeke, M. K., Petschel-Held, G., & Schellnhuber, H.-J. (2004). Syndromes of Global Change: The first panoramic view. *GAIA*.
- Madigan, M. J., & Parker, J. (2000). *Brock biology of microorganismS*. Prentice Hall.
- Mazari H. M., Y. L. (2001). Helicobacter pylori and other enteric bacteria in freshwater environments in Mexico City. *Archives of Medical Research*, 458-467.
- Metcalf & Eddy, I. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Vol. 2. Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización.* . McGraw Hill, México.
- Nájera F., M. C. (2012). *Tesis. Efectos de altas cargas orgánicas en sistemas de lodos activados.* .
- OCDE. (2016 de octubre de 2015). *OCDE*. Obtenido de <http://www.oecd.org/mexico/presentacion-del-estudio-territorial-del-valle-de-mexico.htm>
- OMS. (2016 de Enero de 2008). *Guías de calidad del agua potable, Vol. 1, Caps. 7 y 12*. Obtenido de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_7_fig.pdf
- ONU. (1987). *Informe de Burdland "Nuestro Futuro Común"*. Oslo, Noruega.
- ONU. (6 de Marzo de 2017). *Objetivos del Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>
- Pacheco, J., Cabrera S., A., Steinich, B., Frías, J., Coronado, V., & Vázquez, J. (2017). Efecto de la aplicación agrícola de la excreta porcina en la calidad del agua subterránea. *Revista Ingeniería UADY*, 7-17.
- PAOT. (2002). *Programa para mejorar la calidad del aire 2002-2010*.
- Páramo, A. (30 de 08 de 2016). A prueba, tratadora de aguas residuales; planta de Atotonilco. *Excélsior*, pág. [en línea].
- Peña G., A. (2011). Cap 5. El proyecto de construcción de la macro planta de tratamiento de aguas residuales en Atotonilco de Tula, Hidalgo y su impacto socio espacial. En *Compilación, Aportes para el desarrollo del Estado de Hidalgo vol. 1* (págs. 125-150). Miguel Ángel Porrúa.
- Peña, G. (2011). *El proyecto de construcción de la macro planta de tratamiento de aguas residuales en Atotonilco de Tula, Hidalgo y su impacto socio espacial*.
- Pulido B., A., & Vallejos I., A. (2003). *Gestión y contaminación de recursos hídricos*.
- RAE. (3 de Febrero de 2017). *Real Academia Española. Diccionario usual*. Obtenido de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=efluente>

- Riechard, D. E. (1998). Perception of environmental risk related to gender, community socioeconomic setting, age, and locus of control. *The Journal of Environmental Education*, 11-19.
- Röckstrom, J. e. (2009). Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 1-32.
- Sachs, J. (2008). *Economía para un planeta abarrotado*. Debate.
- Santillán A., A. (2011). Identificación de impactos ambientales en el Distrito de Riego 03 por el empleo de Aguas Residuales. En Compilación, *Aportes para el desarrollo del Estado de Hidalgo, Vol. 1* (págs. 59-90). Miguel A. Porrúa.
- Secretaría de Salud. (3 de Febrero de 2017). *NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994*. Obtenido de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Sen, A. (1977). Social choice theory: A reexamination. *Econometrica*, 53-89.
- Siebe G., C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el Distrito de Riego 03, Tula,Hidalgo. *Int. Contam. Ambiental*, 15-21.
- Siebe G., C., & W.R., F. (1996). Adsorption of Pb, Cd, Cu and Zn by two soils of volcanic origin under long term irrigation with untreated sewage effluent in Central Mexico. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 159, 357-364.
- SIIEH. (3 de Noviembre de 2016). Obtenido de <http://siieh.hidalgo.gob.mx/>
- Singh, A., & Ward, O. (2004). *Applied Bioremediation and Phytoremediation*.
- Steffen, Will et al. (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Phil. Trans. R. Soc. A* , 842-867.
- Tchobanoglous, G. (1985). *Water Quality: Characteristics, Modeling, Modification*.
- Theron, J., & Cloete, T. (2002). “Emerging waterborne infections: contributing factors, agents, and detection tools”. *Critical Reviews in Microbiology*, 1-26.
- Turner, B. e. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 8074-8079.
- UNESCO. (2015). *Agua para un mundo sostenible: Datos y cifras*.
- UNESCO. (4 de Marzo de 2017). *Organización de Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura*. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/es/education/themes/leading-the-international-agenda/education-for-sustainable-development/sustainable-development/>
- Unidas, O. d. (1987). *Informe de Burdtiland "Nuestro Futuro Común"*. Oslo, Noruega.: Organización de Naciones Unidas.

Vázquez-Alarcón, A. e. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos del Valle del Mezquital. . *Rev. Agrociencia*, 267-274.

Vilches, A. e. (2015). Ciencia de la Sostenibilidad: ¿Una nueva disciplina o un nuevo enfoque para todas las disciplinas? *Revista Ibero-americana de Educação*, 39-60.

Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., & Melillo, J. M. (1997). Human Domination of Earth's Ecosystems. *Science*, 494-499.

ANEXOS

Anexo A. Población del Valle del Mezquital.

Municipio	Población, no. De personas (2015)
Actopan	56429
Ajacuba	18320
Alfajayucan	20332
Atitalaquia	29683
El Arenal	18807
Atotonilco de Tula	38564
Cardonal	18347
Chapantongo	13789
Chilcuautila	18169
Francisco I. Madero	35872
Huichapan	45959
Ixmiquilpan	93502
Mixquiahuala de Juárez	46224
Nopala de Villagrán	16896
Progreso de Obregón	23451
San Salvador	35547
Santiago de Anaya	17032
San Agustín Tlaxiaca	36079
Tasquillo	16403
Tecozautla	37674
Tepeji del Río de Ocampo	87442
Tepetitlán	10932
Tetepango	11624
Tezontepec de Aldama	53009
Tlahuelilpan	19389
Tlaxcoapan	28490
Tula de Allende	109093
Total	643490

Anexo B. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Valle del Mezquital y valores establecidos por las diferentes instancias internacionales.

Parámetro	Relevancia para la salud (OMS, 2006)	EPA (1977)	Directiva 98/83/CE (límites de detección en porcentaje de valor paramétrico)
Coliformes fecales MPM/100mL	No detectables en ninguna muestra de 100 ml	No debe contener coliformes.	Se establecen en ISO 9308-1 o EN ISO 9308-2.
E. Histolytica	Alta relevancia	n/d	n/d
Salmonella (3 tipos) CFU/mL	Alta relevancia	n/d	n/d
Shigella CFU/MI	Alta relevancia	n/d	n/d
Huevos de helminto (huevo/L)	Alta relevancia	n/d	n/d
pH	Es un parámetro operativo de calidad del agua importante.	>6.0	0.2
Turbidez (NTU)	parámetro operativo importante en el control de los procesos de tratamiento	n/d	25% del valor paramétrico
DBO (Demanda bioquímica de oxígeno)	N/D	n/d	n/d
Sólidos disueltos	La presencia de concentraciones altas de SDT puede resultar desagradable para los consumidores.	n/d	n/d

Fuente: Elaboración propia con base en las normativas de la OMS (2006) *Guías de calidad del Agua Potable*; EPA (2009) [recuperado de]:

https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf, (1986) [recuperado de]:

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=00001MGA.pdf>, Directiva 98/83/CE [recuperado de]: <https://www.boe.es/doue/2015/260/L00006-00017.pdf>.

Anexo C. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Valle del Mezquital y valores establecidos por las diferentes instancias internacionales.

Parámetro	Relevancia para la salud (OMS, 2006)	EPA, 1977 (Límites permisibles)	Directiva 98/83/CE (límites de detección en porcentaje de valor paramétrico)
Cobre (mg/L)	El valor de referencia (2000 microgramos/l). No se han establecido riesgos para la salud, aunque la presencia de este metal se debe a corrosión de tuberías.	1.3	0.1
Cadmio (mg/L)	El valor de referencia es de 0.03 mg/l. Posible afección a la salud renal.	0.005	0.1
Cromo (mg/L)	El valor de referencia es de 0.05 mg/l para cromo total en agua. El cromo puede ser cancerígeno para la salud humana por inhalación.	0.1	0.1
Zinc (mg/L)	El valor de referencia es de 3 mg/l. Un hombre adulto requiere de 15 a 20 mg/kg al día.	7400	n/d
Sodio (mg/L)	Las concentraciones presentes en el agua de consumo no son peligrosas para la salud.	n/a	0.1

Fuente: Elaboración propia con base en las normativas de la OMS (2006) *Guías de calidad del Agua Potable*; EPA (2009) [recuperado de]: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf, (1986) [recuperado de]: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=00001MGA.pdf>, Directiva 98/83/CE [recuperado de]: <https://www.boe.es/doue/2015/260/L00006-00017.pdf>.

Anexo D. Parámetros de calidad del agua evaluados en el Valle del Mezquital y valores establecidos por las diferentes instancias internacionales.

Parámetro	Relevancia para la salud (OMS, 2006)	EPA (1977)	Directiva 98/83/CE (límites de detección en porcentaje de valor paramétrico)
Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Las concentraciones mayores a 1.5 mg/l pueden ocasionar problemas de sabor y olor.	n/a	n/d
Mercurio (mg/L)	El valor de referencia es 0,006 mg/l. Los efectos tóxicos se observan en riñones tras exposiciones breves o prolongadas.	0.002	20%
Nitritos (mg/L)	Su toxicología se ha asociado con la metahemoglobinemia en lactantes.	1	10%
Nitratos (mg/L)	Los efectos toxicológicos son los mismos que los nitritos.	10	10%

Fuente: Elaboración propia con base en las normativas de la OMS (2006) *Guías de calidad del Agua Potable*; EPA (2009) [recuperado de]: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf, (1986) [recuperado de]: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=00001MGA.pdf>, Directiva 98/83/CE [recuperado de]: <https://www.boe.es/doue/2015/260/L00006-00017.pdf>.

Anexo E. Cuestionario aplicado en entrevistas semiestructuradas (sondeo)

Guía de preguntas sobre el sistema de agua residual en el Valle del Mezquital.

1. ¿Desde hace cuánto tiempo vive usted en la localidad? ¿En dónde nació? ¿A qué otra actividad se dedica?
2. ¿Se dedica a la actividad agrícola? ¿Desde hace cuánto tiempo?
3. Puede decirme en dónde se encuentran ubicadas las parcelas
4. ¿Usted sabe de qué canal le dan agua para sembrar?
5. ¿Qué siembra regularmente y cada cuánto?
6. ¿Sabe qué cantidad de agua ocupa para su cultivo (agua por hectárea o tiempo por hectárea)?
7. ¿El agua que ocupa para sembrar es totalmente de riego o también siembra temporal?
8. ¿Aplica fertilizantes en el suelo y de qué tipo?
9. ¿Cuánto invierte para producir en su parcela?
10. ¿Aproximadamente de cuánto es su inversión anual para sembrar?
11. ¿Usted considera que utilizar agua residual para sembrar es bueno o malo? ¿por qué?
12. Si tuviera la oportunidad de regar con otro tipo de agua (esto depende del distrito al que vaya), presa Endhó, Río Tula o agua de pozo ¿Cuál preferiría y por qué?
13. ¿Considera que tener contacto con el agua residual puede provocar enfermedades? ¿Por qué?
14. ¿Tiene conocimiento de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Atotonilco?

Anexo F. Preguntas (jefes de operaciones):

1. ¿Es usted originario de alguna localidad del Valle del Mezquital? ¿de cuál?
2. ¿Cuánto tiempo llevas siendo jefe del distrito de riego?
3. ¿Has sido jefe de os otros distritos de riego? ¿De cuáles?
4. ¿Sabe cuáles son las principales actividades económicas en el Valle del Mezquital?
5. ¿Tiene conocimiento sobre los tres distritos de riego dentro de esta zona?
6. ¿Conoce el funcionamiento del sistema agrícola en la zona? Descríbalo
7. ¿Qué opina del sistema de agua residual implementado para riego?
8. ¿En qué medida considera que este sistema beneficia a la economía de la zona?
9. ¿Conoce los riesgos que implica el empleo de agua residual en el riego agrícola?
10. ¿Considera que la población está consciente de que el sistema de agua residual es un riesgo?
11. ¿Sabe de iniciativas en materia política para la reducción del riesgo que este sistema implica?
12. ¿En qué año se implementó la primera iniciativa para mejorar la calidad del agua?
13. ¿Qué opina de la Planta Tratadora de Agua Residual Atotonilco?
14. ¿Sabe en qué consiste el objetivo de esta planta de tratamiento?
15. ¿Considera que la planta de tratamiento beneficiará a la población? ¿De qué manera?