



BEREMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
INSTITUTO DE CIENCIAS
POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

**CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO ATOYAC EN EL
VALLE DE PUEBLA Y EL RIESGO EN LA SALUD
DE LA POBLACIÓN EMILIO PORTES GIL,
MUNICIPIO DE OCOYUCAN, PUEBLA.**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

MSc. GABRIELA PÉREZ CASTRESANA

Directora de tesis:

Dra. Anabella Handal Silva



Diciembre 2019



BEREMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
INSTITUTO DE CIENCIAS
POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

“La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra”

**CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO ATOYAC EN EL
VALLE DE PUEBLA Y EL RIESGO EN LA SALUD
DE LA POBLACIÓN EMILIO PORTES GIL,
MUNICIPIO DE OCOYUCAN, PUEBLA.**

TESIS

Que para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

MSc. GABRIELA PÉREZ CASTRESANA

Comité Tutorial:

Directora y Tutora	Dra. Anabella Handal Silva
Integrante Comité Tutorial	Dr. Víctor Tamariz Flores
Integrante Comité Tutorial	Dra. Elsa Castañeda Roldán
Integrante Comité Tutorial	Dra. Lucía López Reyes
Integrante Comité Tutorial	Dr. Fernando Hernández Aldana



RECONOCIMIENTOS

La investigación titulada “**Calidad del agua del Río Atoyac en el valle de Puebla y el riesgo en la salud de la población Emilio Portes Gil, municipio de Ocoyucan, Puebla**” se llevó a cabo bajo la Dirección y Tutoría de la Dra. Anabella Handal Silva y del Comité Tutorial: Dr. Víctor Tamariz Flores, Dra. Elsa Castañeda Roldán, Dra. Lucía López Reyes, Dr. Fernando Hernández Aldana.

La investigación se realizó en las siguientes dependencias: Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, Laboratorio de Microbiología de Suelos del Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas, Laboratorio de Suelos Agrícolas del Departamento de Investigaciones en Ciencias Agrícolas (DICA) y Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química del ICUAP.

Se agradece el apoyo al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (601562) y a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) por los apoyos otorgados al proyecto de investigación.

Los productos de la tesis fueron los siguientes:

Artículos:

1-Anabella Handal Silva, Gabriela Pérez Castresana, José L., Morán-Perales, José L. y García-Suastegui, Wendy. 2017. **Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas**. Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable 3(9): 10-23. ISSN-2410-4019. ECORFAN. CONACYT-RENIECYT.

2-Gabriela Pérez Castresana, Víctor Tamariz Flores, Lucía López Reyes, Fernando Hernández Aldana, Rosalía Castelán Vega, José Luis Morán Perales, Wendy Argelia García Suastegui, Alfonso Díaz Fonseca, Anabella Handal Silva. 2018. **Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México**. Water 2018, 10 (3), 267; ISSN 2073-4441 doi:10.3390/w10030267. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/3/267>

3-Gabriela Pérez Castresana, Elsa Castañeda Roldán, Wendy García Suastegui, José L. Morán Perales, Abel Cruz Montalvo, Anabella Handal Silva. 2019. **Evaluation of Health Risks due to Heavy Metals in a Rural Population Exposed to Atoyac River Pollution in Puebla, Mexico.** Water 2019, 11 (2), 277; ISSN 2073-4441, doi: 10.3390/w11020277 <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/277>

Congresos:

1-**Pérez-Castresana, G**, López, L., Handal, A. Morán, J. *Calidad microbiológica del agua del río Atoyac en el Valle de Puebla.* Simposio de modelos microbianos de importancia para la salud, investigación básica y biotecnología. BUAP. Junio 2016.

2-**Pérez-Castresana, G**, López, L., Tamariz, V., Handal, A. Morán, J. Análisis de la calidad del agua para consumo humano y riesgo agrícola en la comunidad Emilio Portes Gil, municipio de Ocoyucan, Puebla (México). I Congreso Internacional de Microbiología básica y aplicada. Septiembre, 2017. BUAP.

3-**Pérez-Castresana, G**. XXIX Coloquio de investigación del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales. Calidad del agua del río Atoyac en el Valle de Puebla y el riesgo en la salud de la población Emilio Portes Gil, municipio de Ocoyucan. 2018. BUAP.

4-Handal Silva, A, **Pérez Castresana, G**. L. López Reyes, E. Castañeda Roldán, V. Tamariz Flores, Fernando Hernández Aldana, J. Morán Perales, W. García Suastegui. 2019. Calidad bacteriológica del Río Atoyac en el Valle de Puebla, México. Ponencia oral en el XXIII Congreso Español de Toxicología y VII Iberoamericano. Sevilla, España. Del 26 - 28 de junio 2019.

DEDICATORIA

Este trabajo lo quiero dedicar a mi hijo Rodrigo y a José Enrique Piñango "Junior" los cuales han sido mi motor y fuente de inspiración en esta etapa de mi vida. También lo dedico a mi Venezuela hermosa, la cual ha sido fuertemente golpeada por el gobierno nefasto.

AGRADECIMIENTO INSTITUCIONAL

Agradezco al Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, al Laboratorio de Microbiología de Suelos del Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas, al Laboratorio de Suelos Agrícolas del Departamento de Investigaciones en Ciencias Agrícolas (DICA), al Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química del ICUAP, a la Vicerrectoría de Investigaciones y Estudios de Posgrado (VIEP) por los apoyos otorgados a la investigación, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada (601562).

AGRADECIMIENTO PERSONAL

Agradezco a todas aquellas personas que contribuyeron con este trabajo y con mi crecimiento académico-personal en estos cuatro años. Los aportes fueron diferentes pero valiosos. Unos a través de su amistad y confianza, otros con su apoyo en campo y laboratorio, y otros mediante sus contribuciones académicas. Entre estos, menciono a mi amigo Abel, Lessett, y Karla, y a mis profesores Anabella, Tamariz, Lucía y Fernando. Muchas gracias a todos.

También quiero agradecer a México y a mis hermanos mexicanos por todas las oportunidades y por el cariño entregado. Hoy día me siento en casa.

¡Muchas gracias!

INDICE

I.	RESUMEN.....	1
II.	INTRODUCCIÓN.....	3
III.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
IV.	JUSTIFICACIÓN.....	7
V.	HIPÓTESIS.....	9
VI.	PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
	6.1 Pregunta General.....	10
	6.2 Preguntas Particulares.....	10
VII.	OBJETIVOS.....	11
	7.1 Objetivo General.....	11
	7.2 Objetivos Específicos.....	11
VIII.	MARCO TEÓRICO.....	12
	8.1 Visión de la problemática de contaminación del Río Atoyac desde las Ciencias Ambientales.....	12
	8.2 Contaminación de los ríos en México.....	16
	8.3 Contaminación del agua en la Cuenca del Río Balsas.....	18
	8.4 Estado de contaminación del Río Atoyac.....	20
	8.5 Aguas residuales y tratamiento	22
	8.6 Problemática del riego con aguas residuales en México.....	25
IX.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
	9.1 Área de Estudio.....	27
	9.2 Metodología.....	31

9.2.1	Componente Medioambiental.....	32
9.2.1.1	Trabajo de Campo.....	32
9.2.1.2	Trabajo de Laboratorio.....	36
9.2.1.3	Análisis Estadísticos.....	39
9.2.2	Componente Humano.....	40
9.2.2.1	Situación socio-económica y condiciones de salud de EPG....	40
9.2.2.2	Evaluación el riesgo de enfermedades por el consumo de metales del agua subterránea.....	40
X.	RESULTADOS.....	45
10.1	Componente Medioambiental.....	45
10.1.1	Contaminación del Río Atoyac en sequía-lluvia (2016).....	49
10.1.2	Contaminación del Río Atoyac a nivel espacial.....	50
10.1.3	Contaminación generada entre 2011-2016 (Río Atoyac).....	51
10.3.4	Calidad de agua subterránea en la población de EPG.....	51
10.2	Componente Humano.....	53
10.2.1	Información demográfica y socioeconómica.....	55
10.2.2	Agua para consumo humano y sistema de drenaje.....	56
10.2.3	Enfermedades infecciosas y no infecciosas.....	58
10.2.4	Evaluación de riesgo debido a la ingesta del agua subterránea en EPG.....	58
XI.	DISCUSIÓN.....	62
XII.	CONCLUSIONES.....	76
XIII.	RECOMENDACIONES.....	78

XIV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....80

I. RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo general evaluar la calidad del agua del Río Atoyac en el Valle de Puebla y los riesgos a la salud en la población Emilio Portes Gil (EPG), Municipio Ocoyucan. Los muestreos se efectuaron durante el 2016, en tres zonas del río ubicadas en el tramo de 25 km que bordea el municipio de Puebla, en época de lluvia y sequía. También se analizó la calidad del agua de las fuentes de abastecimiento de agua potable en EPG, cuya población depende exclusivamente del agua del Río Atoyac para el riego de sus cultivos.

En el estudio se demostró el estado anóxico del Río Atoyac ($\sim 1.47 \text{mgO}_2/\text{L}$) y la alta contaminación orgánica, particularmente en sequía, así como la presencia de abundantes poblaciones de bacterias coliformes ($\sim 2,6 \times 10^5 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$), y 11 especies de Enterobacterias de importancia patogénica. La contaminación orgánica, medida a través de la DQO, registró un incremento promedio del 49% en el período 2011-2016, y se detectaron incrementos en la concentración de Fe, Al, Pb, y Cd en porcentajes variables. Se evidenció que el agua para riego y de los pozos se encuentra contaminada con bacterias fecales (104-549 NMP/100mL), entre ellas patógenas. En los pozos y en el manantial, la concentración de metales fue cinco veces mayor en sequía. En alguna de las muestras de agua subterránea, las concentraciones de Fe, Al, Ni, y Pb, excedieron los estándares para consumo humano, registrándose un mayor riesgo potencial por la ingesta colectiva de metales (HI) en niños. En ningún caso, se detectó riesgo de enfermedades no cancerígenas a largo plazo. Por el contrario, el riesgo carcinogénico por la exposición oral del Cr, fue encontrado mucho mayor que el límite aceptable (1×10^{-6}), particularmente al considerar el agua del manantial.

El estudio indica que la contaminación del Río Atoyac se ha incrementado en el tiempo, que el agua utilizada para el riego de cultivos no es apta para tal uso de acuerdo a la NOM CE-CCA-001-1989, y que las fuentes de agua para consumo humano en EPG están contaminadas posiblemente por la infiltración del agua del Río Atoyac. Se concluye que la ingesta del agua de los pozos y del manantial, implica un riesgo en la salud, particularmente en sequía, ya que en esta temporada existe un

flujo continuo del agua contaminada del Río Atoyac debido a los mayores requerimientos para el riego.

II. INTRODUCCIÓN

El Río Atoyac, en Puebla y Tlaxcala, presentan un estado de degradación severa. Sus aguas están contaminadas en prácticamente toda su extensión pues en su cauce se vierten aguas residuales (sin tratar o deficientemente tratadas) de la cuarta zona metropolitana más importante del país “ZM Puebla-Tlaxcala”, donde habitan aproximadamente 3 millones de persona y se localizan cientos de industrias de diferentes giros como la petroquímica, química, metalmecánica, automotriz, y textil, entre otras. El río recibe continuamente, contaminantes químicos de diversa naturaleza como metales pesados, hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles, desechos hospitalarios, y contaminantes microbiológicos que ingresan principalmente al sistema a través de los drenajes municipales (IMTA, 2005; Montero *et al.*, 2006; Sandoval *et al.*, 2009; Declaratoria, 2011; Rodríguez y Morales 2014; Morales-Mejía, 2016; INEGI 2016).

La situación ambiental en torno a este río es crítica y no se restringe a la contaminación del agua. Actividades humanas antagónicas o excluyentes se llevan a cabo en este ecosistema ribereño que amenazan a la salud pública. Al tiempo que se vierten en el lecho del río efluentes residuales tóxicos, el recurso hídrico es utilizado para el riego de cultivos en amplias extensiones agrícolas (Martínez y Palerm, 2000; Méndez *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2002; Rodríguez y Morales 2014, Bonilla *et al.* 2015). Un área de 21 322 ha. en la región de Tecamachalco-Tehuacán (17 municipios), es regada con el agua del Río Atoyac que es embalsada en la presa Valsequillo (Rodríguez y Morales, 2014; CONAGUA, 2015; Bonilla *et al.*, 2015). Otros municipios, como Atlixco y Ocoyucan, también hacen uso del agua de este río para la irrigación en ciertas zonas rurales, a partir de un desvío en la presa Echeverría, en Santa Clara de Ocoyucan (Palerm y Martínez, 2000).

El uso agrícola de agua contaminada es una práctica no sustentable que desencadena múltiples problemas ambientales con implicaciones en la salud humana (Cisneros *et al.*, 2001; Cisneros *et al.*, 2008; Reyes *et al.*, 2016). Además de la contaminación de suelos y cultivos, el uso del agua del Río Atoyac para riego agrícola

puede afectar la calidad del agua subterránea por la infiltración de los contaminantes hacia el subsuelo (Rodríguez y Morales, 2014). En el caso del riego con el agua del Río Atoyac, los riesgos son potencialmente mayores tomando en cuenta que su toxicidad ha sido demostrada a través de diversos bioensayos (IMTA, 2005; Montero *et al.*, 2006; Sandoval *et al.*, 2009; Bravo *et al.* 2015; Arellano *et al.*, 2015; Morales-Mejía 2016).

La población de Emilio Portes Gil, en Ocoyucan, es una de las tantas poblaciones agrícolas que dependen exclusivamente del agua del Río Atoyac para riego de sus cultivos, pues en el municipio existen serios problemas en relación al servicio de agua (CEIGEP, 2015), razón por la cual sus habitantes se ven en la necesidad de excavar pozos de manera clandestina para obtener el líquido vital. Sin embargo, a pesar de los beneficios que proveen los pozos rurales en términos de la disponibilidad hídrica, estos presentan un alto riesgo de contaminación, ya que el agua del Río Atoyac fluye a través de cientos de canales alrededor del poblado, y son vulnerables a la contaminación por la falta de asesoría de expertos para su correcta construcción y protección, así como por la poca profundidad de los mismos (Chávez *et al.*, 2013).

A pesar del riesgo que representa para la salud de los habitantes la irrigación con aguas residuales sin tratamiento (CONAGUA, 2010 y FAO, 2013), además de encontrarse prohibida en la legislación vigente, esta práctica se hace en todo el territorio sin ningún tipo de control o regulación y sin previa evaluación de los riesgos que pueden afectar a la seguridad y salud pública (CONAGUA, 2010).

Por tal motivo, estudios como el presente representan una contribución a la comprensión del problema ambiental desde su complejidad, mediante un análisis interdisciplinario que permitirá describir de manera integral la problemática, mediante la integración de la información ambiental, social y de salud.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Río Atoyac se ubica entre las corrientes más contaminadas del país (IMTA, 2005, Rodríguez y Morales, 2014). En su cauce se han detectado más de 50 contaminantes, entre lo que figuran, compuestos y elementos cancerígenos para el humano reconocidos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) (IMTA 2005, Montero *et al.*, 2006, Sandoval *et al.*, 2009).

Como estrategia del gobierno federal para el mejoramiento del río, se expidió en el 2011 el instrumento técnico legal “Declaratoria de clasificación del Río Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes”, el cual contiene los parámetros que deben cumplir las descargas, así como los plazos y metas de calidad para las diferentes secciones del río. Sin embargo, los estudios posteriores a la fecha de expedición de la misma, muestran que las aguas se encuentran muy contaminadas (Arellano *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2017; Pérez-Castresana *et al.* 2018).

A pesar del estado tóxico del río, el agua es utilizada para el riego de cultivos, como sucede en la localidad E. Portes Gil, en la cual hay un enorme potencial de efectos adversos a la salud ya que no se aplican las medidas sanitarias preventivas, ni se toman en cuenta aspectos que pudieran reducir la probabilidad de contagio de enfermedades infecciosas, así como lo relacionado con el manejo de cultivos, y el tratamiento adecuado de las fuentes de abastecimiento de agua potable.

Además del riesgo potencial por la presencia de organismos patógenos, otro de los problemas serios producidos por el uso de aguas residuales en la agricultura, se debe al contenido de sustancias tóxicas en las aguas residuales. Y aunque poco se conoce sobre la variedad de contaminantes químicos presentes en el agua del Río Atoyac, la diversidad de los mismos debe ser elevada tomando en cuenta que este transcurre por la cuarta zona metropolitana más grande a nivel nacional, y en él se descargan aguas residuales de cientos de industrias y de los municipios más poblados. En ninguno de los casos antes citados hay plantas que cuenten con tratamiento terciaria capaces de eliminar contaminantes específicos, tal como los metales pesados (Navarro *et al.*, 2003; IMTA, 2005; Rodríguez *et al.*, 2012; Rodríguez

y Morales, 2014; INEGI, 2016; CNDH, 2017). De manera que, estos elementos químicos, al igual que otros contaminantes, se liberan como residuos de procesos industriales u otras actividades humanas en el agua del río, y pueden ser trasladados a otros lugares más distantes, contaminando suelos y otros cuerpos de agua (Thompson *et al.*, 2007).

La contaminación del agua subterránea por metales pesados representa una amenaza para las poblaciones que beben el agua, debido a los efectos citotóxicos, carcinogénicos, y mutagénicos que producen muchos de estos metales cuando ingresan al organismo (Kakkar *et al.*, 2005; Marcovecchio *et al.*, 2007; Jaishankar *et al.*, 2014; Malik *et al.*, 2016). Las poblaciones humanas corren el riesgo de contraer enfermedades como trastornos del sistema nervioso central, trastornos cardiovasculares, insuficiencia renal y osteoporosis, entre otros; además de predisponer a los niños a un desarrollo cognitivo deficiente, y a un mal desarrollo de órganos (Momodu y Anyakora, 2010, ATSDR, 2011; Bhargava *et al.*, 2017).

Estudios sobre el riesgo de enfermedades en la región del Alto Atoyac por la exposición de metales pesados en el agua subterránea no existen; sin embargo, se han cuantificado los riesgos por la exposición a metales pesados presentes en el suelo de estas regiones o en la leche de las vacas alimentadas con pasto irrigado con aguas residuales (Castro *et al.*, 2017a). En dichos trabajos se demuestra como la salud de los niños se encuentra en alto riesgo por el consumo de arsénico (elemento carcinogénico) presente en la leche de vacas, y también como la de los hombres adultos de las poblaciones agrícolas se encuentran en riesgo de sufrir enfermedades por la exposición dérmica a metales pesados presentes en los suelos (Castro *et al.*, 2017a; Castro *et al.*, 2017b). Sin embargo, a la fecha no existen estudios en la región, sobre la contaminación de los pozos rurales y el riesgo que implica para la salud humana la ingesta del agua subterránea.

IV. JUSTIFICACIÓN

La problemática social y ambiental en relación al Río Atoyac es compleja y ha sido poco estudiada. Se desconoce el grado de contaminación actual, y la magnitud del cambio de la contaminación en el tiempo, tampoco existen estudios sobre la dinámica espacio-temporal de la calidad del agua donde se comparen con los estándares establecidos en el documento técnico-legal más reciente conocido como la “Declaratoria de clasificación de los Ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes”, en la cual, se indican los valores de los contaminantes medidos en el río para el 2011.

El Río Atoyac además de ser el cuerpo receptor de desechos industriales y municipales, sus aguas son utilizadas para el riego de cultivos en zonas agrícolas adyacentes a la zona metropolitana, como es el caso de la localidad Emilio Portes Gil; esto representa una situación socioambiental que requiere ser evaluada, ya que diversos problemas pueden ocurrir por la contaminación de las cosechas, suelos o aguas subterráneas.

La salud pública depende del acceso al agua potable y saneamiento, entre otros factores. Contaminar las fuentes de agua y el medio ambiente con aguas residuales que no han sido tratadas pone la vida de todos en riesgo, especialmente en las comunidades más desfavorecidas como es el caso de la población de E. Portes Gil que por décadas ha utilizado las aguas residuales del Río Atoyac. Se ha demostrado que estas aguas contienen patógenos como los coliformes fecales, que pueden ocasionar enfermedades en los agricultores que tienen contacto con ella, y para quienes consumen los frutos de las hortalizas regadas con esas “aguas negras”. Otro aspecto nocivo del agua, es el olor fétido que despide, además, por ser agua de re-uso, puede contener elementos potencialmente tóxicos como metales pesados, compuestos orgánicos como grasa, aceite y fármacos.

Ante esta situación, estudios como el presente representan una contribución a la comprensión del problema ambiental por la contaminación del Río Atoyac y su

impacto en la salud de una población específica, mediante un enfoque interdisciplinario que permitirá analizar de manera integral la problemática, estableciéndose relaciones entre la salud, el medio ambiente y lo social.

Finalmente, la investigación contribuirá de manera importante al conocimiento científico por la aportación de información ecológica que permitirán evaluar la calidad ambiental del Río Atoyac, así como, su evolución como consecuencia de la actividad del hombre, misma que en la actualidad es limitada.

V. HIPOTESIS

La contaminación del Río Atoyac genera consecuencias adversas que se manifestarán en la salud de las personas que hacen uso del recurso hídrico.

VI. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

6.1 General

¿Cuál es el grado de deterioro del agua del Río Atoyac en el Valle de Puebla y cuáles son los riesgos potenciales a los que se encuentra expuesta la población de Emilio Portes Gil por su uso en la agricultura?

6.2 Preguntas particulares

- ¿Cuál es la calidad bacteriológica y por metales pesados del agua del Río Atoyac en el Valle de Puebla y en la localidad agrícola Emilio Portes Gil?
- ¿La calidad del agua del Río Atoyac es apropiada para uso agrícola de acuerdo a los estándares establecidos en la PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017?
- ¿Cuáles son los riesgos a los que se encuentra expuesta la población rural de Emilio Portes Gil por el uso de las aguas servidas provenientes del Río Atoyac para uso doméstico y agrícola?

VII. OBJETIVOS

7.1 Objetivo General

Evaluar la calidad del agua del Río Atoyac en el Valle de Puebla y los riesgos en la salud de la población Emilio Portes Gil, Municipio Ocoyucan, Puebla.

7.2 Objetivos Particulares:

- Describir las características biofísicas del Río Atoyac en el Valle de Puebla y de la zona agrícola de E. Portes Gil.
- Analizar la información social, económica y de salud de la población de E. Portes Gil.
- Estimar la densidad de coliformes totales y fecales, y la composición taxonómica de enterobacterias en el agua del Río Atoyac en los pozos y manantial destinado para consumo humano en la localidad E. Portes Gil.
- Determinar la concentración de metales pesados en el agua del Río Atoyac en los pozos y manantial, destinado para consumo humano en la localidad E. Portes Gil.
- Evaluar los riesgos a los que se encuentra expuesta la población de E. Portes Gil, Municipio de Ocoyucan.

VIII. MARCO TEÓRICO

8.1 VISIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DE CONTAMINACIÓN DEL RÍO ATOYAC DESDE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

La crisis ambiental contemporánea es la mayor amenaza que afecta a la humanidad en toda su historia. El problema es grande y complejo por lo que es urgente incrementar su comprensión a fin de posibilitar la emergencia de alternativas de aminoración. La contaminación registrada en el Río Atoyac es alarmante y no parece detenerse. Las metas de saneamiento se han repetido durante casi una década, invirtiéndose millones de pesos en proyectos enfocados en la construcción de obras hidráulicas, y/o propuestas de soluciones técnicas y regulatorias, sin lograr avances significativos.

De acuerdo a Foladori y Tommasino (2012) y Aledo (s/f) las alternativas técnicas solo pueden ser paliativas cuando existen relaciones sociales que promueven la degradación ambiental, de manera que dichas propuestas de solución son el resultado de un enfoque reduccionista y de corto alcance como consecuencia de la separación epistemológica entre sociedad y naturaleza.

El concepto de medio ambiente se ha utilizado generalmente para señalar el ambiente como el entorno biofísico que rodea o sirve de escenario a la actividad humana, y es usado como medio, elemento o insumo para satisfacer las necesidades humanas que, de hecho, son culturales e históricas. Por lo tanto, los llamados problemas ambientales se han ubicado por fuera de la actividad social y se visualizan como problemas en los ecosistemas. Esta visión corresponde a una escisión entre naturaleza y sociedad propia de la cosmovisión de la modernidad, que divide analíticamente los elementos constitutivos del mundo y sirve de base al modelo de desarrollo actual, sustentado en la visión mecanicista de la naturaleza, que pasa a ser un stock de mercancías, cuyo precio depende de su escasez. En consecuencia, con esta conceptualización, las acciones dirigidas a la solución de los problemas ambientales se mueven en el ámbito de lo tecnológico o de la generación de normas

para evitar la destrucción de los recursos, o de incentivos para promover conductas deseables, reducidos a enfoques normativos o remediales. Puesto que el ambiente se reduce al entorno biofísico que sirve de soporte a la actividad humana, los problemas ambientales se entienden como todo efecto que se manifieste en este entorno, como agotamiento de un recurso, daño o contaminación. De esta forma, los campos de conocimiento que se ocupan del ambiente corresponden a las ciencias naturales, básicas o aplicadas, y a las ingenierías; poco o nada tendrían que ver las ciencias sociales. Para tal marco ideológico, basta prohibir o incentivar conductas y dar soluciones técnicas dirigidas a resolver dichos problemas (González Ladrón de Guevara, 2007).

Aledo (s/f) sostiene que, las consecuencias prácticas que devienen del enfoque reduccionista y de corto alcance como consecuencia de la separación epistemológica entre sociedad y naturaleza se concretarían en la propuesta de soluciones siempre limitadas y parciales que, sobre todo ante problemas ambientales, se mostrarían como claramente inoperantes. Así por ejemplo, el intento de solución tecnológica a la contaminación atmosférica producida por los vehículos de motor de explosión, basada en la colocación de filtros en los tubos de escape, muestran sus limitaciones en la medida en que se deja fuera del proceso de reflexión, para su solución, a cuestiones sociales clave, relacionadas con factores de tipo cultural fundados en la raíz del problema, como pueden ser los procesos de hiperbolización del auto como marca referencial individual.

En virtud de lo mencionado, los problemas ambientales sólo se resolverán en la medida en la que se produzcan cambios estructurales en los procesos sociales (tecnológicos, organizacionales, económicos, cognoscitivos y políticos); no basta con acciones en la estructura normativa para incentivar o prohibir conductas, o con acciones técnico-instrumentales y, o, mercantiles. El ambiente es el resultado de la interacción entre sociedad y naturaleza e implica una forma particular de ser social y de paisaje (González Ladrón de Guevara, 2007).

Es probable que el origen del fracaso de los proyectos de saneamiento del Río Atoyac en el pasado se encuentre relacionado con todo lo mencionado.

Sin duda que la contaminación del Río Atoyac, al igual que todos los problemas ambientales son sumamente complejos. Aledo (s/f) señala “la complejidad de la crisis ambiental se entiende desde dos acepciones. Primero por su multicausalidad: demográfica, económica, sociológica, tecnológica y cultural. Los problemas ambientales están íntimamente relacionados con el modelo de producción, la desigualdad y el crecimiento de la población humana. La orientación del modelo productivo, dirigido no tanto a satisfacer las necesidades básicas como a producir para el mercado con el objetivo de maximizar los beneficios en el mismo tiempo posible, termina por generar modelos socioeconómicos profundamente inestables. Y segundo, porque es expresión de una crisis más amplia; es decir, de un modelo de civilización que presenta una relación insostenible con el medio ambiente y que llega a provocar un miedo profundo por la situación de incertidumbre ante el futuro en que nos posiciona. Alcanzar al propio mito de desarrollo, que queda reducido a mero crecimiento económico, pone en duda a la ciencia, con el derrumbe de los paradigmas tradicionales basados en el conocimiento especializado y fragmentario; afecta a las sociedades, cada vez con mayores desequilibrios y desigualdades, y en última instancia, cuestiona los valores imperantes de la sociedad capitalista, basados en el consumo y en una cosmovisión antropocéntrica que reduce a la naturaleza a simple materia”

El caso del municipio de Tepetitla de Lardizábal en Tlaxcala, es emblemático y es un claro ejemplo de lo que señala Aledo (s/f) y de lo que ocurre en el país.

El principal problema ambiental que se presenta en este municipio es la contaminación del Río Atoyac generada por las actividades industriales textiles, en especial por las actividades del lavado de mezclilla que realizan las lavanderías y la empresa Tarrant-México (480 trabajadores). Tepetitla pasó de ser una comunidad agrícola, a ser preponderantemente manufacturera en los últimos 30 años y, a la fecha, su población vive prácticamente de la realización de actividades industriales.

Sin embargo, los aparentes aspectos positivos de su estructura económica (generación de empleos e ingresos en forma de salarios y beneficios) no se ven compensados por el malestar que trae consigo la contaminación, ya que ésta producción manufacturera produce importantes volúmenes de residuos que, al no contar con la disposición final y manejo adecuados, genera elevados niveles de contaminación dentro de la misma comunidad, causando daños a la salud de la población (Rodríguez y Morales, 2011).

El proceso de lavado de la mezclilla requiere de una gran cantidad de agua de primer uso, así como variados aditamentos químicos para tratar las prendas, por lo que las aguas residuales que generan las lavanderías contienen diversos contaminantes químicos que se descargan la mayoría de las veces sin tratamiento, al drenaje municipal o a canales de riego, que finalmente desembocan en el Río Atoyac. Lo que resulta contrastante es que una sola empresa como Tarrant-México contamine más que el conjunto de talleres de la localidad, y que dada su capacidad económica como empresa trasnacional no aplique procesos de tratamiento eficientes, lo que cuestiona las causas de incumplimiento (Rodríguez y Morales, 2011).

A pesar de Rodríguez y Morales (2011) describieron la problemática de contaminación del Río Atoyac tomando en cuenta una variedad de factores, su propuesta con respecto a la solución del problema fue netamente técnica, haciendo énfasis en la necesidad de la adopción de eficientes plantas de tratamiento con bajos costos de operación.

Es muy probable que su propuesta sea el resultado de un enfoque reduccionista, mecanicista y simplificador propio de las disciplinas científicas tradicionales, las cuales han sido incapaces de contribuir sustancialmente con la solución de los múltiples problemas ambientales, ya que en el seno de estas no se promueve el pensamiento complejo, sino por el contrario se enseña a “descomponer o fragmentar” la naturaleza para analizarla.

La incapacidad de analizar el problema desde su complejidad, y la exclusión del hombre o sociedad dentro del concepto ambiente, difícilmente nos permitirá

entender el problema y por lo tanto proponer soluciones viables ante los múltiples problemas ambientales.

8.2 CONTAMINACIÓN DE LOS RÍOS EN MÉXICO

En un planeta modelado por el agua, los ríos sólo albergan una pequeña fracción del total del agua menor al 1%; cifra menor que la de cualquier otro compartimiento hidrológico; no obstante, tienen una enorme importancia por conectar las cuencas terrestres con la atmósfera y con el mar, funcionando como los verdaderos riñones de la Tierra, y albergando buena parte de la biodiversidad del mundo (Sabater, 2009).

En México existen cerca de 42 ríos principales que trascurren en tres vertientes: occidental o del océano Pacífico, oriental o del océano Atlántico (Golfo de México y Mar Caribe), e interior cuyos ríos desembocan en lagunas interiores (INEGI, 1995 citado en *agua.org.mx*). La contaminación es uno de los principales problemas que enfrentan las cuencas fluviales en el país, y muchos de los ríos solo transportan aguas residuales provenientes de los asentamientos urbanos, sin ser tratadas previamente, debido a que en la mayoría de los principales centros de población no poseen plantas de tratamiento o funcionan de manera deficiente, por lo que las aguas residuales llegan directamente a los ríos llevando sustancias como sulfato de alquilo, nitratos y metales pesados (Ayala, 2009).

De acuerdo a las cifras de CONAGUA (Comisión Nacional de Agua), en México solo el 26% de los ríos, lagos y embalses que monitorea son de buena calidad, en tanto que el 74% restante, el agua tiene diferentes grados de contaminación. Los principales contaminantes son: materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo) y microorganismos (coliformes totales y coliformes fecales), pero hay otros como los metales pesados y los derivados de hidrocarburos, que se presentan en áreas con actividad industrial. Al respecto, los resultados de la evaluación de la calidad del agua en el país muestran que las cuencas que tienen ríos con mayor grado de

contaminación son las de Lerma, Alto Balsas, Río Colorado y Alto Panuco (Agua en México/CEMDA, 2006).

En México, la mayor parte de la contaminación ambiental es de origen urbano, industrial, agrícola y pecuario y las principales fuentes de contaminación del agua provienen de las prácticas agrícolas, por el uso indiscriminado de los pesticidas y fertilizantes. Asimismo, los centros de población con sus sistemas de descarga (doméstico y público), alteran fuertemente la calidad del agua de los ríos donde las aguas son descargadas. En muchas ciudades de México el agua residual, y el agua de lluvias son transportadas a través de un solo sistema de drenaje, por lo que estas aguas residuales municipales tienen orígenes tan diversos como zonas habitacionales, comercios, talleres, industrias, presentando una composición muy variada. Es preciso señalar que, las descargas industriales incorporadas o no al sistema de drenaje municipal contienen metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas, que no se degradan fácilmente en condiciones naturales (Agua en México/FUSDA, 2006 y Ayala, 2009). Se desechan metales como plomo, cromo, cadmio y hierro que en condiciones de alta acidez alcanzan aguas subterráneas, siendo la principal preocupación, los compuestos altamente tóxicos o cancerígenos (Ayala, 2009).

La calidad del agua es un factor determinante en la salud pública y en los ecosistemas. El 80% de las enfermedades reportadas en los países en desarrollo están relacionadas con la ingesta de agua contaminada; en el planeta mueren diariamente, 25.000 personas de enfermedades que se transmiten por medio del agua (Ayala, 2009).

El agua está asociada a la transmisión de enfermedades, ya sea por ingesta directa o mediante la contaminación de los alimentos, por lo que su calidad está estrechamente relacionada con la calidad de vida de la población. En México los padecimientos gastrointestinales ocupan el primer lugar de las enfermedades endémicas, siendo las aguas residuales la fuente principal de microorganismos como bacterias, protozoarios, helmintos y virus (Ayala, 2009).

La contaminación del agua afecta de manera especial la salud de niños menores de 5 años víctimas de enfermedades diarreicas. En México las tasas más altas de mortalidad por cada 100 000 habitantes por este tipo de enfermedades se concentran en los estados de Chiapas (49.82%), Oaxaca (44.77%) y Puebla (41.59%) (Agua en México/FUSDA, s/f).

En México los problemas de calidad de agua son severos y tienen un fuerte rezago en su atención comparados con los relacionados a la cantidad y a la provisión de servicios a la población. El monitoreo de la calidad de agua es un proceso que debe ser eficaz, regulado y actualizado. De la misma manera, la evaluación de la calidad de agua es indispensable para poder orientar esfuerzos que favorezcan su reutilización. Las deficiencias en el monitoreo de la calidad de agua determinan impactos negativos en la salud pública y en el ambiente difíciles de cuantificar (Agua en México/FUSDA, s/f).

8.1 CONTAMINACIÓN DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO BALSAS

Muchos de los ríos del centro y occidente del país se encuentran severamente afectados, tal es el caso del Río Balsas (CONAGUA, 2016; RNM 2012-2015), uno de los más importantes de México (vertiente occidental) por la extensión de su cuenca (117 406 km²), la cual representa el 6% del territorio nacional. La cuenca incluye a los estados de Morelos (100%), Tlaxcala (75%), Puebla (55%), México (36%), Oaxaca (9%), Guerrero (63%), Michoacán (62%) y Jalisco (4%) (DOF, 2010), y descarga sus aguas en el océano Pacífico (agua.org.mx, INE: www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros y SEGOG Secretaria de Gobernación/<http://dof.gob.mx/diario> oficial de la gobernación).

La cuenca del Balsas está conformada por quince subcuencas hidrológicas, y entre estas, la subcuenca del Alto Atoyac con una superficie de aportación de 4 135.52 km², comprende parte de los estados de Puebla (22 municipios) y Tlaxcala (47 municipios) (DOF, 2010; Rodríguez y Morales, 2014), donde se localizan los ríos Zahuapan, Alseseca, y Atoyac (SEGOG Secretaria de Gobernación/<http://dof.gob.mx/diario> oficial de la gobernación) (Figura 1).

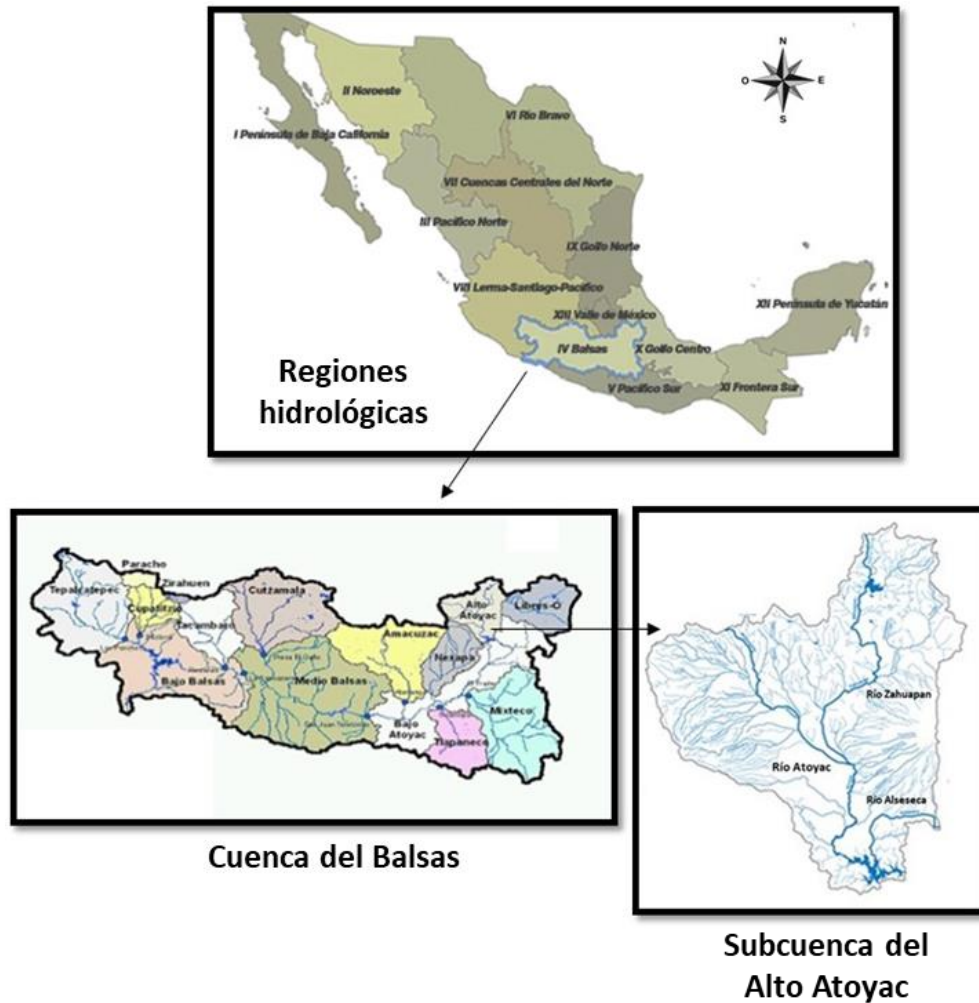


Figura 1. Ubicación geográfica de la Cuenca del Río Balsa y la Subcuenca del Alto Atoyac. Fuentes: DOF Región Hidrológica número 18 Balsas (2018) y Dale Cara al Atoyac <http://www.dalelacara.org/>.

El Río Balsas es un sistema ecológico que presenta severos problemas de contaminación, donde prácticamente ninguno de sus principales afluentes alcanza el nivel de excelencia que pudiera hacerlo apto para todos los usos y aceptable para la vida acuática. La calidad de los recursos acuáticos representa un problema crítico, ya que las descargas de aguas residuales (domésticas, industriales y de retornos agrícolas) y la disposición de desechos sólidos y peligrosos, constituyen problemas

de vastas dimensiones ambientales, económicas y sociales en toda la cuenca. En la década de los 90 ya se registraban en la zona del delta, niveles de coliformes fecales por encima de las normas establecidas, tanto en época de estiaje como de lluvia. Asimismo, las pruebas de toxicidad de sedimentos revelaron niveles extremadamente tóxicos en estaciones próximas a las plantas industriales y los análisis de bioconcentración de metales tóxicos y plaguicidas demostraron la presencia de estas sustancias en las principales especies acuáticas de interés alimenticio y comercial ([INE:www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros](http://www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros)).

Un alto porcentaje de los ríos de la cuenca del Balsas, presentan un franco y sostenido proceso de degradación. En el Alto Balsas, 12 de los 18 cuerpos de aguas principales presentan niveles altos de degradación. En el Medio Balsas la situación es todavía peor; 9 de sus 10 cuerpos de aguas principales, presentan un estado sistemático de degradación. En el Bajo Balsas, prácticamente todos sus cuerpos principales de agua presentan, muy altos y persistentes tendencias de deterioro. Lo anterior significa que la calidad del agua de los ríos oscila entre niveles que los hacen inaceptables para cualquier uso, sea abastecimiento público, recreación general, pesca y vida acuática, industrial o agrícola, hasta niveles de aceptable solo con tratamiento mayores para el abastecimiento público y los usos industriales y agrícolas. Esta situación se agrava durante el estiaje, especialmente en los ríos del Alto Balsas, cuando los ríos y cuerpos de agua transportan prácticamente solo aguas residuales ([INE:www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros](http://www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros)).

8.2 ESTADO DE CONTAMINACIÓN DEL RÍO ATOYAC

El Río Atoyac presenta en la actualidad un fuerte deterioro en la calidad de sus aguas; este recorre aproximadamente 80% de la Zona Metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT), cuarta concentración humana más grande de México (~ tres millones de habitantes) (IMTA, 2005; Rodríguez y Morales, 2014).

La degradación del Río Atoyac es histórica y compleja. Varios investigadores han estudiado el agua del Atoyac como referente de desarrollo económico, político y social de la ciudad de Puebla en diferentes periodos de su historia. Durante los siglos XVII, XVIII y XIX los impactos de las actividades antropogénicas eran relativamente bajos y los ríos tenían la capacidad de autodepuración y se mantenían en equilibrio ecológico; no se alteraban los ciclos naturales de circulación de las corrientes y nutrientes y los movimientos migratorios de las especies. En la década de los 70s con la instalación de fábricas relacionadas con la petroquímica, la metálica y la automotriz, que se suman a la textil, la degradación del Río Atoyac se inicia y se incrementa en los años 90 por la expansión demográfica y el desarrollo económico en la región (Gamboa, 1985; Bermúdez de Castro, 1985; Leicht, 1986; De Alcalá y Mendiola, 1992; Loreto, 1994; Carabarán; 2000; Ventura; 2006; Rodríguez y Morales, 2014).

La presión humana que se genera sobre el Río Atoyac es muy fuerte. Este río cruza o bordea 16 municipios de la ZMPT; a los pocos kilómetros de su nacimiento en las faldas del volcán Iztaccíhuatl, el río ingresa a San Martín Texmelucan, segunda ciudad más poblada de Puebla (152 051 habitantes), donde se ubica el Corredor Industrial Quetzalcóatl. En Tlaxcala, el río recibe sustancias nocivas provenientes de las industrias de tres corredores industriales, Quetzalcoatl, Ixtacuixtla y Huejotzingo, del Complejo Petroquímico independencia y de más de 30 empresas de la maquila de mezclilla intraurbana. Así, en el río se descargan las aguas de cientos de industrias de diferente giro, entre las que destacan las textiles (30%), las farmacoquímicas (24%), las de alimentos (20%), y las metalúrgicas (9%) (IMTA, 2015).

El Río Atoyac, también recibe grandes cantidades de contaminantes orgánicos por los vertidos municipales deficientemente tratados, y contaminantes químicos de plaguicidas y fertilizantes (Navarro *et al.* 2003; Montero *et al.*, 2006; Sandoval, *et al.*, 2009; CNDH, 2017). De manera que existe una gran heterogeneidad en esta región, coexistiendo actividades agrícolas, pecuarias, industriales y zonas residenciales (Montero *et al.*, 2006; Rodríguez y Morales, 2014; Arellano *et al.*, 2015).

A la contaminación puntual y difusa del Atoyac, se le suma la proveniente del Río Zahuapan (afluente del Atoyac), en cuya área de influencia vive aproximadamente 59 % de los habitantes de Tlaxcala (Muñoz *et al.*, 2012). El río ingresa nuevamente al estado de Puebla y bordea a los municipios de Cuautlancingo, San Andrés de Cholula, Ocoyucan, y Puebla, que en su conjunto comprende el 35% de la población total del Estado poblano en un territorio que representa menos del 3% de la superficie de la entidad federativa. En esta zona urbana, además de concentrarse la mayor densidad poblacional (97% de la población de la ZMPT), se encuentran 14 zonas industriales que incluyen fábricas de diferentes giros (IMTA, 2005; Flores *et al.*, 2016 Martínez *et al.*, 2017). En esta sección también se descargan las aguas de tres macroplantas de tratamiento de la ciudad de Puebla, las cuales además de contener aguas municipales, incluyen aguas de los parques industriales Cuautlancingo y Camino a San Lorenzo. Recibe también contaminantes industriales por las corrientes del arroyo Atenco y el Río San Francisco, los cuales son tributarios o afluentes del Río Atoyac en dicha sección, así como, las descargas directas de industrias automotrices, textiles, metalmeccánicas, metalúrgicas, farmacoquímicas, de alimentos, entre otras (IMTA, 2005).

A la fecha se han encontrado en el agua del río y afluentes, más de 50 contaminantes, entre los que figuran, compuestos y elementos carcinogénicos para el humano reconocidos por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), tales como benceno, cloruro de vinilo, níquel, cadmio, cromo, arsénico; otros compuestos y metales que se pueden anticipar razonablemente sean carcinogénicos por los datos que existen, tales como nitrobenceno, plomo, cloroformo, cloruro de metileno, 1,2 diclorobenceno, 1,2 dicloroetano, tolueno, tetracloroetileno, dietilftalato, bromodiclorometano, nitratos, nitritos, 1,3 diclorobenceno, y un teratógeno muy potente como el mercurio (Montero *et al.*, 2006; Sandoval *et al.*, 2009; Declaratoria del río, 2011; Morales-Mejía, 2016; Greenpeace, 2004; Navarro, 2005; IMTA, 2005).

8.4 AGUAS RESIDUALES Y TRATAMIENTO

El crecimiento de la población, el acelerado proceso de urbanización, la intensificación de las actividades productivas y la concentración de las actividades industriales en algunas regiones del centro y el norte del país, son las causas más importantes del aumento de los volúmenes de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas, responsables de la disminución de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas del país (Comité Vive Atoyac, 2018).

En México las aguas residuales están compuestas de aguas residuales municipales, industriales y aguas de infiltración (CONAGUA, 2008). Las aguas residuales municipales incluyen a las domésticas, cargada de contaminantes microbiológicos, nitrógeno y fósforo, y a las aguas servidas proveniente de servicios y comercios, las cuales además de contaminantes microbiológicos, contienen metales pesados y sustancias orgánicas, aunque en concentraciones más bajas que las de origen industrial (Cisneros *et al.*, 2001).

De acuerdo con el diagnóstico del Programa Nacional Hídrico 2014-2018 “desde diciembre de 2012 se tiene una infraestructura de 2 342 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con una capacidad instalada de 140.1 m³/s. Sin embargo, sólo se tratan en promedio 99.8 m³/s, equivalente al 47.5 % de aguas residuales colectadas en los sistemas formales de alcantarillado. El sector industrial generó en 2012 un caudal medio de 210 m³/s. Existe un total de 2 569 plantas con capacidad instalada de 89 m³/s, de las cuales operan 2 530 y tratan 60.5 m³/s de efluentes industriales.

Las aguas residuales industriales provienen de los procesos de transformación de materia prima a materias elaboradas a gran escala (industrias petroquímicas, farmacéutica, textil, automotriz, etc.), siendo sus elementos contaminantes muy variables, pero generalmente muy específicos y se encuentran en muy altas concentraciones, predominando entre ellos, metales pesados y sustancias orgánicas muy tóxicas. Las aguas residuales industriales generalmente contienen muy altas concentraciones de elementos específicos, lo que resulta en aguas altamente tóxicas,

inclusive al simple tacto en algunos casos; ejemplo de estos elementos tóxicos son el Cr^{6+} hexavalente generado en las industrias de las curtidurías, y el Pb^{4+} e hidrocarburos bencénicos provenientes de las industrias petroquímicas (Cisneros *et al.*, 2001).

Cisneros *et al.*, (2001) señalan que para poder utilizar las aguas residuales provenientes de las industrias para el riego, estas deben de recibir un pretratamiento interno (dentro de la misma industria) antes de ser descargadas a los cuerpos de agua, de modo de que las concentraciones de tóxicos, característicos para cada giro industrial, sean disminuidos hasta niveles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas y poder después considerar estas descargas como descargas municipales y puedan ser tratadas como tales en los sistemas de tratamiento municipal.

A nivel nacional se tratan el 49% de las aguas residuales de origen municipal y el 31% de aguas residuales de origen industrial, no obstante, de las aguas industriales solo se remueve un 14% de la carga de contaminantes (CONAGUA, 2015). México tiene un déficit importante en los volúmenes de tratamiento, además de que las aguas residuales reciben un procedimiento mayormente básico (primario), que no garantiza la calidad suficiente como para ser descargadas a los cuerpos de agua superficial sin ser causa de efectos indeseados en su calidad (Comité Vive Atoyac, 2018).

El Río Atoyac recibe grandes cantidades de agua residual sin tratamiento. De acuerdo con el marco legal vigente, estas descargas son ilegales y por ello, frecuentemente, se encuentran ocultas por la vegetación de galería o sumergidas. Además de las descargas directamente de industrias y viviendas, el río recibe las aguas de las siguientes plantas de tratamiento: Barranca del Conde, San Francisco y Atoyac Sur, las cuales no cumplen con los criterios de calidad de descarga, rebasando los Límites Máximos Permisibles de acuerdo la PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 para sólidos suspendidos, DBO_5 , grasas y aceites, así como para coliformes fecales (Comité Vive Atoyac, 2018).

8.5 PROBLEMÁTICA DEL RIEGO CON AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

En México la problemática del agua es predominantemente local. El grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico es muy fuerte en ciertas zonas del país, como en el centro, norte, y noroeste del territorio, en las cuales se concentra el 80% de la población y se dispone del 33% del total del agua renovable del país, a diferencia de la zona sureste que posee el doble de agua y la población es apenas del 20%. Asimismo, la mayor actividad agrícola, la cual demanda la mayor cantidad de agua a nivel nacional, esto es, un 77% del total del agua concesionada para uso consuntivo (uso extractivo), se realiza en las entidades del centro y norte (Jiménez Cisneros *et al.*, 2010, Estadística en México 2014, CONAGUA, 2015).

El agua para uso agrícola se extrae principalmente de los cuerpos de aguas superficiales (66.4%) (CONAGUA, 2015), los cuales muchos de ellos se encuentran contaminados, tal como es el caso del Río Atoyac

En el país, el uso del agua residual en la agricultura se inició desde principios del siglo pasado. A partir de entonces, el uso de aguas residuales se ha incrementado conforme el crecimiento poblacional y el desarrollo urbano, industrial y de servicios, así como por la escasez de otras fuentes de agua (CONAGUA, 2008).

México es el segundo país en el mundo, después de China, que utiliza aguas residuales crudas para el riego (Cisneros *et al.*, 2001). Diferentes autores y la propia CONAGUA reportan que alrededor de 350 000 ha se riegan con agua residual cruda o mezcladas con aguas de primer uso en diferentes proporciones (CONAGUA, 2008). Para el 2001 más del 60% de las aguas residuales generadas en las grandes ciudades del país, se aprovechaban en el riego agrícola (Cisneros *et al.*, 2001), lo cual nos lleva a pensar en el riesgo que estas prácticas representan para la salud, sobre todo tomando en cuenta que el uso de aguas residuales en la agricultura se viene haciendo desde hace tiempo, de manera desordenada o incontrolable (CONAGUA, 2010). El antecedente más remoto en el país se ubica en el valle de México, donde las aguas negras sin tratamiento fueron canalizadas hacia el estado de Hidalgo (Valle de Tula), con lo cual se propició su uso en la agricultura. Alrededor de 90 000 ha de tierras de

regadío del Valle de Tula dependen de dichas aguas crudas (CONAGUA, 2008, y FAO, 2013).

Aunque se menciona que las aguas residuales pueden ser consideradas como un recurso alternativo producto de la escasez del recurso hídrico, con posibilidades de aprovecharse en la agricultura dada la gran demanda de agua en este sector a nivel nacional e internacional (Cisneros *et al.*, 2001), es importante señalar que dicho planteamiento se refiere al uso de aguas tratadas o regeneradas, más no crudas. El uso de aguas negras en el país, es producto de la contaminación de los cuerpos de agua que han sido y siguen siendo utilizados para el riego de cultivos, lo cual no debe ser visto como un recurso alternativo, ni como una práctica sustentable.

Jiménez Cisneros *et al.* (2010) señalan, que las áreas agrícolas que antes contaban con aguas de primer uso para el riego ahora no tienen otra opción más que usar aguas residuales sin tratamiento para el riego. El represamiento de los cuerpos de agua, el crecimiento de los asentamientos urbanos, y el desarrollo de grandes centros industriales, sin una infraestructura con capacidad de saneamiento suficiente, propició que muchos de los ríos se convirtieran paulatinamente en canales conductores de aguas negras (Jiménez Cisneros *et al.*, 2010).

La CONAGUA (2010) señala que el uso de aguas residuales en la agricultura se viene haciendo desde hace tiempo sin ningún control, y que su manejo ha sido similar al manejo de agua de primer uso en zonas de riego. Los problemas relacionados con el uso de aguas crudas pueden ocurrir debido a la contaminación de las cosechas, suelos y aguas subterráneas y superficiales, por contenidos nocivos en las aguas residuales, principalmente de contaminantes patógenos y parasitarios, y sustancias tóxicas. Atribuibles en el primer caso a descargas domésticas, de hospitales, rastros, fábricas de procesamiento animal y laboratorios, y en el segundo a descargas de actividades industriales. La población de más alto riesgo es aquella que está expuesta al contacto con las aguas residuales, como el campesino y su familia, la población aledaña a la zona de riego y aquella que es consumidora de los

productos alimenticios derivados directamente o indirectamente del riego, principalmente aquellos que se consumen crudos (CONAGUA, 2010).

El hecho de que las aguas residuales que se utilizan crudas para el riego de cultivos en el país sean una mezcla de las aguas municipales e industriales, y que solo se remueve un 14% de los contaminantes de origen industrial (CONAGUA, 2015), representa un elevado riesgo para la salud.

La observancia de efectos mutagénicos, cancerígenos y otros efectos que pueden ser crónicos, atribuibles a concentraciones de estos tóxicos en cultivos y agua subterránea, hace suponer que existen graves riesgos a la salud pública. En el caso de las zonas regadas con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, se encuentran contaminantes tóxicos, como elementos traza y compuestos orgánicos, que se caracterizan porque muchos de ellos, aun en cantidades muy pequeñas, son persistentes y bioacumulativos con efectos adversos a la salud, que son manifestados después de largos periodos de exposición. (CONAGUA, 2010).

IX. MATERIALES Y MÉTODOS

9.1 ÁREA DE ESTUDIO

El Río Atoyac pertenece a la sub cuenca del Alto Atoyac (DOF, 2010). Se origina de los deshielos del volcán Iztaccíhuatl, en el Estado de Puebla, a una altitud de 3250 msnm; tiene una longitud de 84.97 km, una sección transversal entre los 15 y 60 m, y una profundidad de 1 a 3 m. En su descenso, la corriente pasa por el Estado de Puebla (~ 30 km recorrido), Tlaxcala (~ 22 km), y nuevamente por Puebla (~ 32 km) donde se embalsa en la presa de Valsequillo (Martínez et al., 2017, Declaratoria del río, 2011).

El clima de la región es templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual y la precipitación son de 17.2°C y 969.1 mm y las lluvias se incrementan entre junio y octubre (INEGI, 2016; SNM).

La sección de estudio tiene una longitud aproximada de 25 km; inicia al norteoeste del municipio de Puebla, en la represa de Covadonga (Z1) ($19^{\circ}08'15.3''$ N y $098^{\circ}13'27.6''$ O), se continua en la presa Echeverría (Z2) ($19^{\circ}01'07.6''$ N y $098^{\circ}13'58.0''$ O) y finaliza en el canal de riego ubicado en la población de EPG (Z3). Los municipios colindantes son: Puebla al oriente, y al occidente Cuatlancingo, San Andrés de Cholula y Ocoyucan. El Río Atoyac en esta zona, recibe los vertidos de tres macroplantas del municipio de Puebla (El Conde, San Francisco, y Atoyac Sur) y los afluentes de los arroyos Atenco y Rabanillo que transportan descargas de industrias textiles y de hilados, y los Ríos San Francisco y Zapatero (Figura 2). En sus márgenes se encuentran 14 zonas industriales, que vierten sus aguas de forma directa e indirecta al cauce (IMTA, 2005).

El área de estudio también incluye la localidad Emilio Portes Gil (EPG), ubicada en la zona centro occidental del Municipio de Ocoyucan, en el límite con el Municipio de Atlixco. Es una colonia ejidal de 522 habitantes, su principal actividad económica es la agricultura (SNIM, 2010). Se encuentra ubicada en una llanura aluvial con lomerío (suelo aluvial), con suelo dominante Durisol, y un clima templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura oscila entre los $14 - 20^{\circ}\text{C}$ y la precipitación entre los $800 - 1\ 000$ mm (INEGI, 2015). Esta localidad recibe las aguas del Río Atoyac gracias a un desvío artificial del cauce del río a partir de la represa Echeverría, que recorre aproximadamente 6.39 km en superficie y 4.72 km a través de un tubo subterráneo hasta aflorar en dicha localidad, hacia la planta hidroeléctrica Portezuelo I, donde genera electricidad, para luego incorporarse al canal principal de riego de EPG ($18^{\circ}55'32.4''$ N $098^{\circ}20'40.4''$ O) y finalmente descarga al Río Nexapa (Martínez y Palerm, 2000) (Figura 2 y 3). Las viviendas en su mayoría (>90%), tienen agua entubada proveniente de un manantial (figura 4), como el suministro no periódico, algunas viviendas tienen pozo.

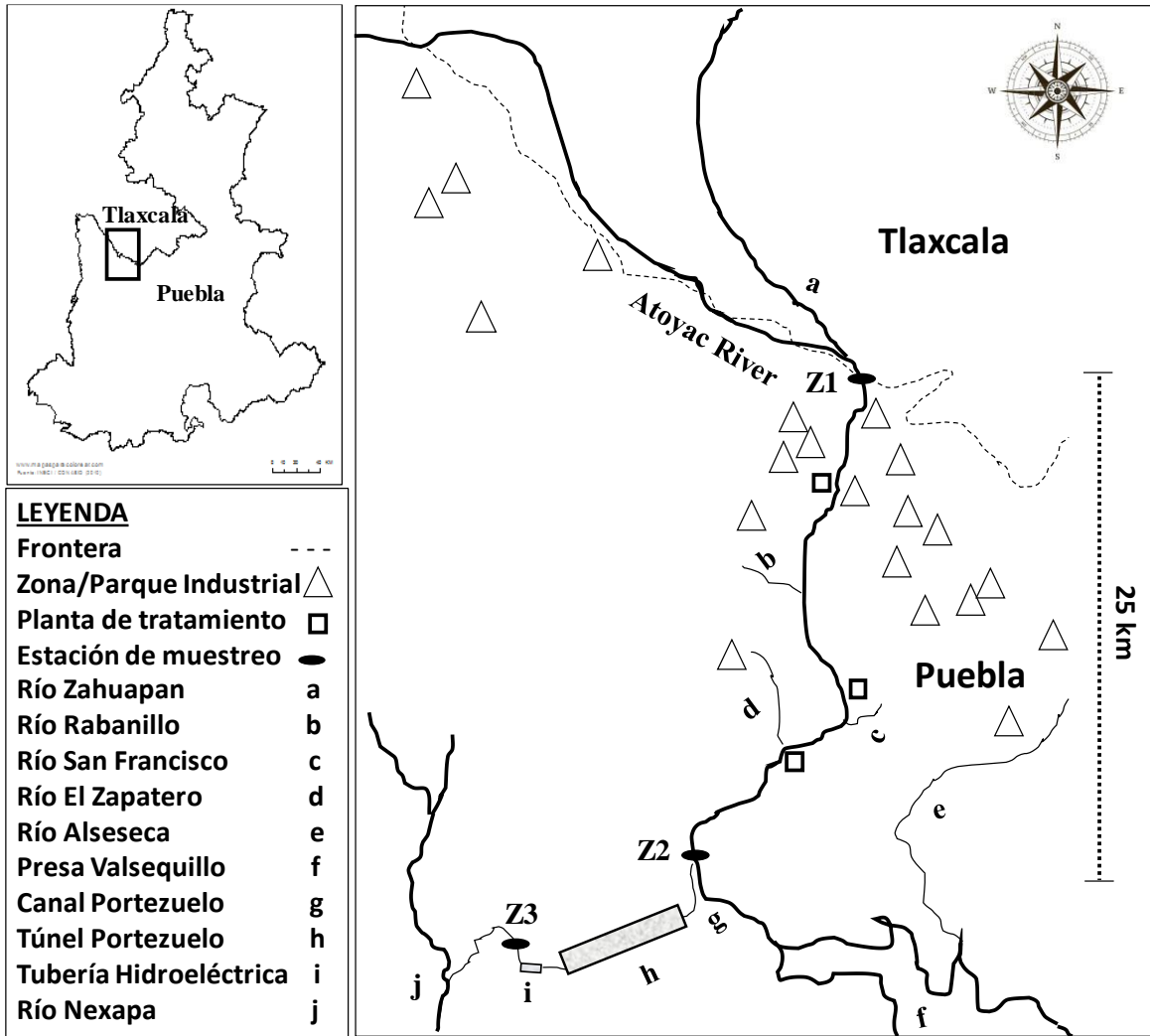


Figura 2. Mapa del área de estudio. Z1: Represa de Covadonga, Z2: Presa Echeverría; Z3: Canal de Riego en Emilio Portes Gil. Elaboración propia (2016).

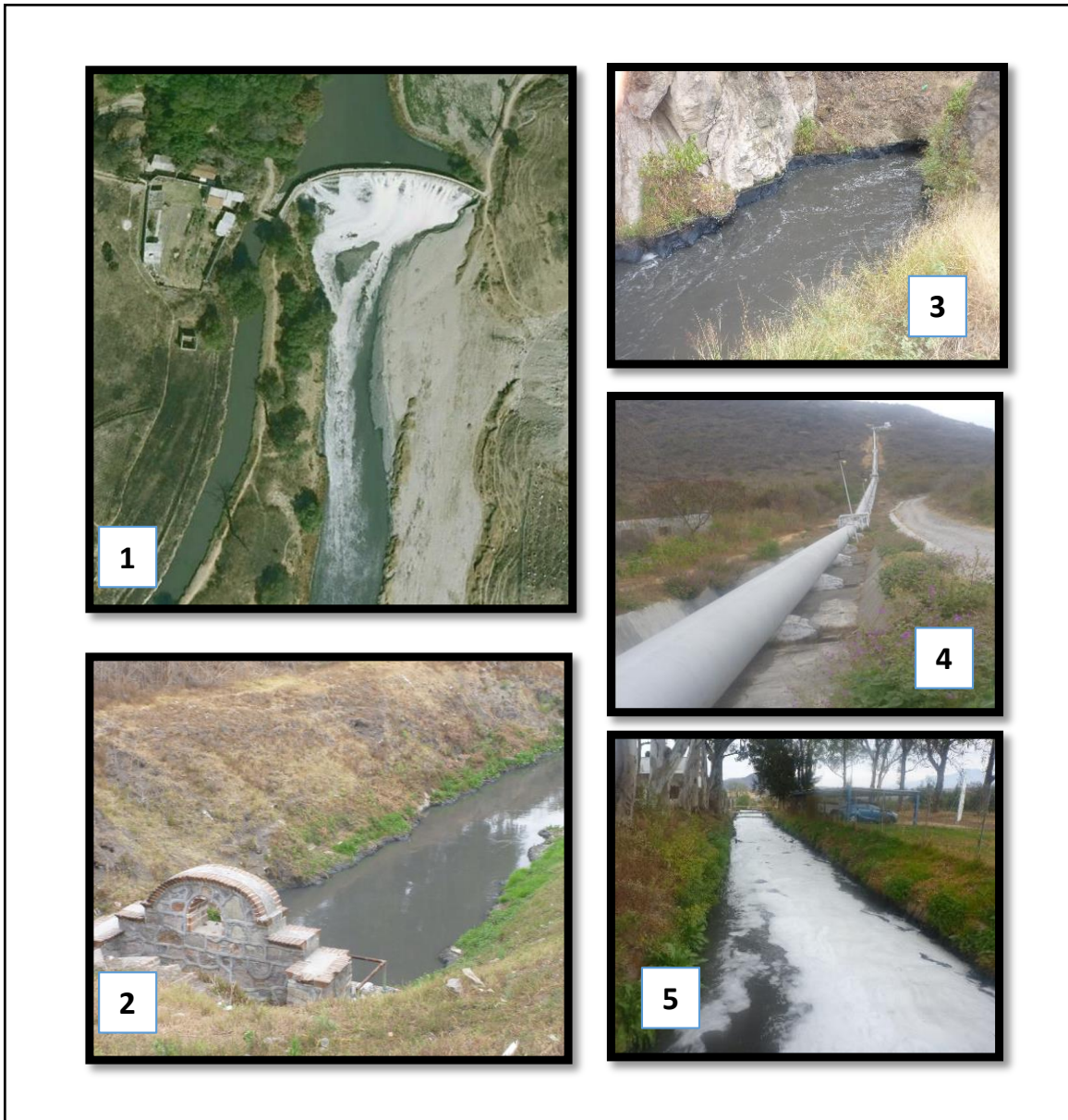


Figura 3. Desvío del caudal principal del Río Atoyac hasta la localidad agrícola Emilio Portes Gil. 1. Desviación del río en la presa Echeverría hacia EPG; 2. Fin del canal superficial e inicio del paso subterráneo del agua; 3. Salida del agua del río; 4) Entubamiento del agua previo a la hidroeléctrica; 5. Salida del agua hacia el canal de riego en EPG.



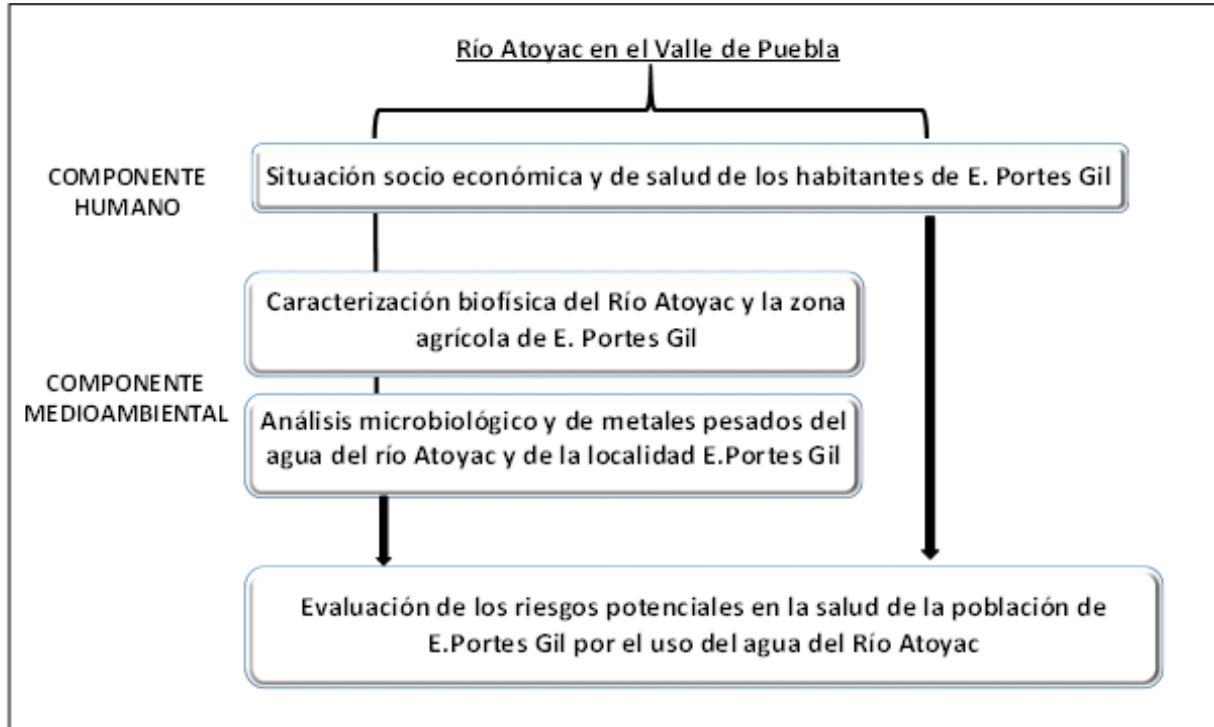
Figura 4. 1. Manantial de Emilio Portes Gil y 2) Almacenamiento de agua potable y paso del agua del Río Atoyac.

9.2 METODOLOGÍA

La investigación se realizó con el apoyo de las siguientes dependencias: Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, Laboratorio de Microbiología de Suelos del Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas, Laboratorio de Suelos Agrícolas del Departamento de Investigaciones en Ciencias Agrícolas (DICA), y Laboratorio de Química Ambiental del Centro de Química del ICUAP.

A continuación, se detalla la metodología que se aplicó para cada uno de los componentes: Medioambiental y Humano de acuerdo al cuadro 1.

Cuadro 1. Esquema de la metodología aplicada en el estudio.



9.2.1 COMPONENTE MEDIOAMBIENTAL

9.2.1.1 Trabajo de Campo.

En el 2016 se realizaron los muestreos en la temporada de lluvias (junio, agosto, octubre) y sequía (mayo, noviembre), en la Represa Covadonga (Z1), Represa Echeverría (Z2), y canal de riego en E. Portes Gil (Z3) (Figura 5). Las coordenadas geográficas de cada zona y sus características se presentan en la Tabla 1.

En cada zona se midió por triplicado la temperatura del agua superficial, el pH, y el oxígeno disuelto (método Winkler) con un medidor portátil Marca Orion No. 9107 wp proff pH triode, y un Test Kit de Oxígeno Disuelto HANNA® HI 3810 (110 test), y se colectaron muestras de agua por triplicado para el análisis de los

parámetros: DQO, DBO₅, bacterias, turbidez (TURB), color y metales pesados (Al, Fe, Cu, Pb, Cd, Zn, Co, Ni, Cr). El volumen de la muestra para la determinación de metales pesados fue de 600 mL. Dichas muestras se almacenaron en frascos de polietileno de cuello ancho y se preservarán con ácido nítrico al 10%. Para la medición de la DQO se tomó un volumen de 70 mL de agua del río, y para la DBO₅ un volumen de 300 mL.

Ambos tipos de muestra se almacenaron en botellas de vidrio con tapa esmerilada, y se mantuvieron en frío y protegidas de la luz. En cuanto a la turbidez, el volumen de la muestra fue de 50 mL y se almacenó en frascos de polietileno de cuello ancho, en frío para su conservación.

Para el análisis bacteriológico se colectó un volumen de 100 mL de agua del río en frascos plásticos esterilizados. A diferencia de los demás parámetros, sólo se colectó una muestra (compuesta) por zona. Todas las muestras bacteriológicas se mantuvieron protegidas de la luz y a una temperatura de 4°C con el objeto de inhibir la actividad bacteriana para no obtener resultados falsos o dudosos. Antes de las 6 horas transcurridas al muestreo, se llevaron a cabo los respectivos cultivos en el laboratorio de microbiología. El procedimiento para la recolección y análisis de muestras se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-042-1987 con algunas modificaciones.

Tabla 1. Características de cada zona de muestreo.

Zonas	Coordenadas	Características	Usos del agua
Z1 (Atoyac arriba)	19°08'15.3" N 098°13'27.6"O	Represa y sistema de canalización de agua para la irrigación de cultivos y generación de energía eléctrica (Municipio de Cuautlanxingo). Zona industrial hacia un margen del río y zona agrícola hacia el otro.	Vertidos de aguas residuales industriales y municipales. Irrigación de sembradíos. Ingesta ganado vacuno, caprino, etc. Generación de energía eléctrica. Descarga de aguas industriales.
Z2 (Atoyac desvío represa)	19°01'07.6" N 098°13'58.0" O	Represa y canalización del agua para la irrigación de los cultivos río abajo (Municipio de Ocoyucan y Puebla). Zona urbana hacia ambos márgenes del río.	Vertido de aguas residuales industriales y municipales e Irrigación de sembradíos en los municipios de Ocoyucan, Atlixco e Izúcar.
Z3 (Atoyac canal riego)	18°55'32.46" N 098°20'40.49" O	Canal de desvío del Río Atoyac ubicado en la localidad de Emilio Portes Gil (Municipio de Ocoyucan). Zona agrícola.	Irrigación de sembradíos

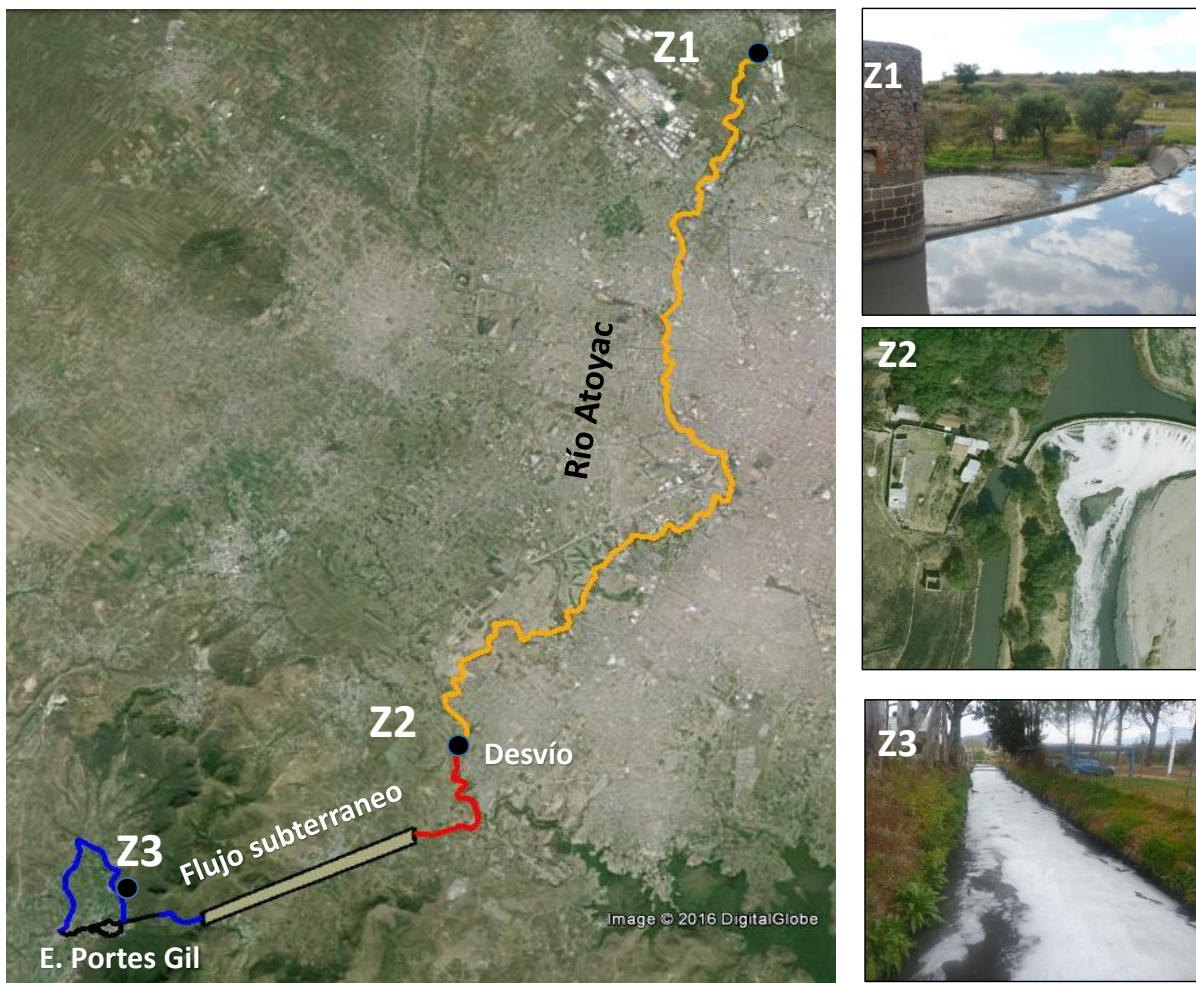


Figura 5. Zonas de estudio. Fotografías de los sitios de colecta de muestras. Elaboración propia (2016).

En la localidad de E. Portes Gil se midieron los parámetros físico-químicos y bacteriológicos anteriormente señalados (excepto DBO_5 y DQO) en 15 pozos y un manantial (Figura 6). La selección de los pozos fue al azar (tres pozos por mes).

En el estudio se realizaron un total de 1230 análisis físico-químicos, y 555 análisis correspondientes al estudio de bacterias (CT, CF, Bacterias mesófilas, API, y pruebas complementarias).

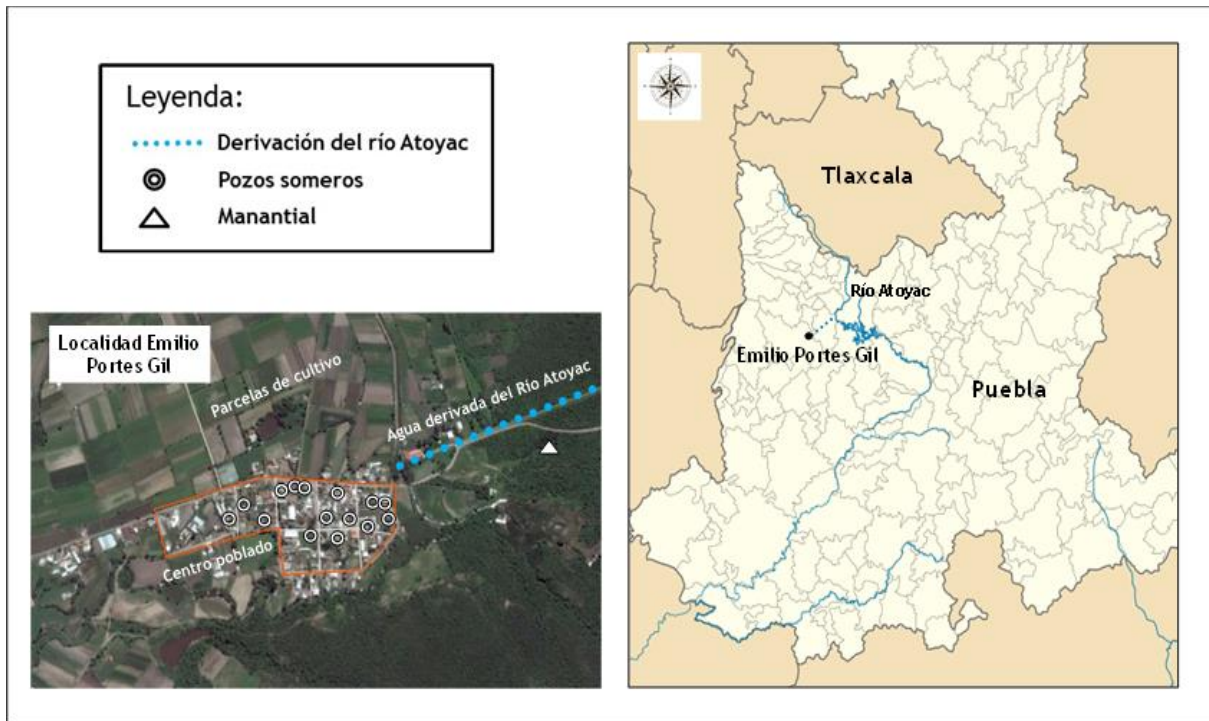


Figura 6. Localidad de Emilio Portes Gil y fuentes de abastecimiento de agua potable donde se colectaron las muestras.

9.2.1.2 Trabajo de Laboratorio.

Parámetros químicos y físicos.

En el laboratorio se determinó la DQO con un kit Spectroquant de rango 25-1500 mg/L. La prueba se basa en el método de la determinación del cromo III y la oxidación del ácido cromosulfúrico, y contiene una serie de tubos o celdas de reacción, en las cuales se coloca 3 mL de muestra. Una vez que la muestra se añade cuidadosamente por las paredes del tubo, se debe tapar y agitar vigorosamente. Luego de realizarse este procedimiento con cada muestra, estas se colocaron en un termoreactor a 148°C por 2 horas para posteriormente dejarse enfriar en la gradilla del kit por 10 min. Finalmente, las mediciones se realizaron en un fotómetro Nova 60 Spectroquant Merck, en el cual se introduce el tubo directamente, seleccionando el número de método 138.

La medición de la turbidez también se llevó a cabo con el fotómetro Nova 60 Spectroquant. El método es muy simple, y solo consiste en trasvasar un volumen de aproximadamente 10 mL de la muestra, sin ningún tipo de tratamiento ni filtrado, a una celda de medición rectangular de 50 mm de espesor, para luego colocarla en el fotómetro seleccionando el número 177.

Para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) se utilizó un incubador OxiTop Control OC 100, el cual contiene 12 botellas ámbar de 500 mL provistas de un sistema de medición manométrica de presión, en cada una de las tapas. El método consiste en la medición de los cambios de presión parcial del oxígeno como consecuencia del consumo en la oxidación biológica de la materia orgánica, añadiendo previamente (inicio de incubación) un inhibidor del proceso de nitrificación, y absorbiendo del sistema, el CO_2 producido mediante pastillas de KOH. Este método respirométrico proporciona una medida directa del oxígeno consumido por los microorganismos en un recipiente cerrado en condiciones de temperatura y agitación constante (60 rpm). El tiempo de incubación fue de 5 días a una temperatura de $20^\circ C$.

El volumen de la muestra que se colocó en la botella de incubación fue de 250 mL; éste se estableció en función de los valores de la DQO medidos en un ensayo preliminar con agua del Río Atoyac, los cuales sirvieron de referencia tomando en cuenta las concentraciones de oxígeno registradas. Luego de añadir las muestras de agua en las respectivas botellas incubadoras, se colocó en cada una de ellas, un agitador magnético, el KOH y una gota del inhibidor de la nitrificación. Finalmente, se le colocaron las “tapas-sensores”, para iniciar el ciclo de medición. Se anotaron las medidas registradas diariamente durante 5 días.

Para la determinación de metales disueltos las muestras se filtraron a través de una membrana de poro de 0,45 micras (Wathman), y posteriormente se preservaron añadiendo ácido nítrico concentrado hasta obtener un $pH < 2$. Todas las muestras se refrigeraron a $4^\circ C$, y fueron analizadas dentro de los 30 días de la colecta. Los estándares de las soluciones de metales para el Absorción atómica fueron de Accutrace TM Reference Standar.

Parámetros bacteriológicos.

La detección y enumeración de los coliformes totales y fecales del agua (Río Atoyac y fuentes de abastecimiento), se llevó a cabo mediante la técnica de fermentación en tubos múltiples de acuerdo a la NMX-AA-042-SCFI-2015. La prueba presuntiva de coliformes totales se hizo en un medio de cultivo líquido de caldo lactosado, mientras que, para la prueba confirmativa, caldo bilis verde brillante.

Se realizaron diluciones de 10^{-1} a 10^{-6} . Por cada dilución se realizaron 5 réplicas. Luego de inocular 1 ml de cada dilución en tubos con el medio lactosado (9 mL/tubo), se incubaron a una temperatura de 35 °C. Los tubos se examinaron a las 24 y 48 horas de incubación. De los tubos positivos, donde se observa la presencia de gas en el interior de la campana de fermentación y turbidez, se procedió a realizar la prueba confirmatoria para coliformes totales y para coliformes fecales o termotolerantes. Para ambas pruebas se inoculó un volumen de 10 μ L a partir de los resultados positivos. El medio confirmativo para los coliformes fecales fue el EC MUG y la temperatura de incubación fue 44 °C.

Al igual que para la presuntiva, el tiempo de incubación fue de 48 horas en esta fase confirmatoria, haciéndose la primera revisión para detectar reacción positiva al cabo de las 24 horas. Las estimaciones de las densidades bacterianas presentes en la muestra original se realizaron mediante el cálculo del número más probable (NMP) a partir del patrón de ocurrencia del resultado positivo en las sucesivas diluciones (pruebas confirmatorias exclusivamente) mediante el empleo de una tabla estadística. Los resultados se expresaron en términos de NMP en 100 mL. Este número está basado en ciertas fórmulas de probabilidad y es un estimado de la densidad media de coliformes en la muestra (Acevedo Barrios et al., 2013).

La identificación y aislamiento de las distintas bacterias coliformes presentes en las muestras, se realizó con el método de estría cruzada en placas con violeta rojo y bilis agar como medio selectivo. La siembra se efectuó a partir de una azada de los tubos positivos de las pruebas confirmatorias. Se incubaron por 24 horas y se enumeraron los diferentes morfotipos, los cuales fueron posteriormente aislados en

placas con el mismo medio de cultivo y a través del mismo método, con la finalidad de describirlos morfológicamente, realizar un registro fotográfico y seleccionar las muestras para las futuras pruebas bioquímicas que se realizarán (API-E20) de Biomerieux para la identificación de las bacterias a nivel de género y especie.

Las Normas Oficiales Mexicanas que se utilizarán en la investigación se presentan en el cuadro 2:

Cuadro 2. Normas Oficiales que se utilizaron en la investigación.

Norma	Descripción
PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
CE-CCA-001-1989	Criterios Ecológicos de Calidad del Agua
NMX-AA-042-SCFI-2015	Determinación del Número Más Probable de Coliformes
NOM-127-SSA1-1994 (Modificación 2000)	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

9.2.1.3 Análisis estadísticos.

A los datos obtenidos se les aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, la prueba de comparación múltiple de Tamhane. Además, se realizó el Análisis de Componentes Principales (ACP) y matriz de correlación (coeficiente Kendall) mediante el uso del software Statgraphics Centuriun e IBM SPSS statistics. Los valores obtenidos se compararon con la Declaratoria de clasificación del Río Atoyac y Xochiac o Hueyapan y sus afluentes, con base en las (NOMs) CE-CCA-001/89, NOM-127-SSA1-94-Modificación (2000), y PROY-NOM-001-SEMARNAT-2017 [43]. Los datos de precipitación mensual se obtuvieron en la página web del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016), y los datos de DBO₅, DQO y Coliformes fecales de la RNM-CONAGUA (2016). Para comparar entre los registros de la Declaratoria oficial del Río

Atoyac (2011), y del presente estudio (2016), los datos de la Declaratoria se expresan en mg/L.

9.2.2 COMPONENTE HUMANO

9.2.2.1 Situación socio-económica y condiciones de salud de EPG.

La información con respecto a la fuente de ingreso familiar, condiciones de salud, datos sobre el agua potable, vertido de las aguas domésticas, servicio del agua, presencia de pozos, así como, aspectos sobre las medidas de protección sanitaria que aplican para evitar el contacto directo con las aguas servidas del Río Atoyac, etc., se obtuvo a través de encuestas (tabla 2) alguna se complementó con los registros del INEGI, la CONAPO, y CEIGEP. La encuesta se aplicó en todas las viviendas, tomando en cuenta la factibilidad del trabajo en función de lo pequeña de la localidad (560 habitantes).

Tabla 2. Encuesta aplicada a nivel de vivienda.

N° Encuesta: _____ N° de la manzana ubicación vivienda: _____ Fecha: _____
 Edad de la persona encuestada _____ Sexo: Femenino (F): _____, Masculino (M): _____
 1. En el hogar viven: N° de niños: F _____, M _____, N° Adolescentes: F _____, M _____, Adultos: F _____, M _____, Ancianos: F _____, M _____
 2. Principal fuente de ingreso del hogar:
 -Venta de Cosecha _____
 -Venta de productos derivados del ganado (leche, quesos, etc.) _____
 -Comercio _____
 -Otros _____
 1. ¿La vivienda cuenta con agua potable entubada? Sí _____, No _____
 2. ¿Cuántos días a la semana reciben el agua entubada?: Todos los días _____, de 3 a 5 días _____, menos de 3 días _____
 3. ¿Cuáles son los usos que se le da al agua entubada?:
 -Aseo personal _____
 -Consumo: _____ ¿Hierve el agua para su consumo? Sí _____, No _____
 -Preparación de alimentos (guisos, tamales, etc.) _____
 -Limpieza de ropa y trastos _____
 -Agua para los animales _____
 6. En caso de no recibir el agua entubada todos los días, ¿de dónde obtiene el agua potable?:
 - Del pozo de la vivienda _____
 - De un tanque almacenador del agua entubada _____
 - Otro _____
 7. Usos del agua del pozo (en caso de tenerlo):
 -Aseo personal: _____
 -Consumo: _____ ¿Hierve el agua para su consumo? Sí _____, No _____
 -Preparación de alimentos (guisos, tamales, etc.): _____
 -Limpieza de ropa y trastos: _____
 -Agua para los animales: _____
 -Otros usos _____
 8. El agua del pozo recibe algún tipo de tratamiento (p.e. pastillas de cloro?): Sí _____, No _____
 9. La vivienda tiene: Pozo séptico: _____, Servicio de alcantarillado: _____
 10. ¿Algún miembro de la familia padece alguna de las siguientes enfermedades **NO infecciosas**?
 -Enfermedad renal (riñón): _____
 -Enfermedad hepática (hígado): _____
 -Enfermedad de nacimiento (congénita): _____/Especificar: _____
 -Leucemia: _____
 -Cáncer: _____/tipo: _____
 -Otra: _____
 Sexo de la persona enferma: F _____, M _____ Edad: _____
 11. ¿Algún familiar tiene alguna de las siguientes enfermedades **Infecciosas** o la tuvo recientemente?
 -Enfermedad respiratoria (gripa, neumonía, faringitis, etc) _____
 -Hongos, urticaria, alergias, u otros problemas en la piel _____
 -Diarrea _____
 -Cólera _____
 -Otra _____
 Sexo de la persona enferma: F _____, M _____ Edad: _____
 12. ¿Algún miembro de la familia trabaja en el campo? Sí _____, No _____
 13. Equipo de protección que utiliza para el trabajo en campo: Guantes: _____, Botas: _____, Tapa boca: _____
 14. En caso de tener cultivos, ¿Qué se cultiva regularmente? _____
 15. ¿Utilizan algún sistema de riego? Sí _____, No _____ ¿Cuál? _____
 16. ¿De donde proviene el agua con la que lavan la cosecha? _____
 17. ¿Consume regularmente lo que se cultiva? Sí _____, No _____
 18. ¿Tiene personas trabajando en sus cultivos? Sí _____, No _____
 19. En caso de tenerlos, ¿son habitantes de Portes Gil? Sí _____, No _____, Algunos _____ (cuantos) _____
 20. Animales que tiene: Perros _____, Gallinas _____, Cerdo _____, Cabras _____, Vacas _____ Otros _____
 21. ¿Algún habitante o integrante del hogar ha fallecido?
 Sí _____, No _____ Edad: _____ Sexo: _____ Causa _____, Año de muerte: _____

9.2.2.2 Evaluación del riesgo de enfermedades por el consumo de metales del agua subterránea.

Para la estimación del riesgo a la salud, primeramente, se estimó la exposición crónica, a lo largo de la vida, de un metal específico mediante la ecuación de la Toma Crónica Diaria (CDI) (método USEPA) (Martín *et al.*, 2016; USEPA, 1986):

$$CDI \text{ (mg/kg/d)} = C \times DI/BW \text{ (ec.1)}$$

Donde,

C = Concentración del metal en el agua para beber (mg/L)

DI = Ingesta diaria promedio de agua potable (L/d)

BW = Peso del cuerpo (kg)

Los pesos promedio de cada subgrupo de la población: adultos, adolescentes y niños se obtuvieron del Instituto Nacional de Salud Pública, así como, la ingesta diaria promedio de agua potable de cada subgrupo (Hernández *et al.*, 2012; ENSANUT. 2016)

Riesgo para efecto No Cáncer.

Se utilizó la ecuación del Cociente de Peligro, HQ, por sus siglas en inglés, Hazard Quotient (Ec. 1), para estimar el riesgo de enfermedades no cancerígenas debido a la ingesta de un metal pesado en particular, en el agua de pozos y el manantial (Martín *et al.*, 2016; USEPA, 1986).

$$HQ_{\text{Metal}} = CDI / RfD \text{ (adimensional)} \text{ (ec.2)}$$

Donde, CDI es la Ingesta Diaria Crónica, y RfD la Dosis de Referencia del metal por la exposición oral (dosis umbral). Los valores de los RfD (dosis umbral en mg/kg/d) se obtuvieron de la base de datos U.S. EPA-IRIS (por sus siglas en inglés Integrated Risk Information System) (<https://www.epa.gov/osa/review-reference-dose-and-reference-concentration-processes>). Los HQ se calcularon para cada uno de los metales y para los subgrupos poblacionales.

El establecimiento de riesgo en la salud por los metales fue interpretado basándose en los valores de HQ. Valores menores que 1 significa que no hay riesgo, y superiores a 1, significa que existe probabilidad de que se produzca efecto adverso en la salud (Martín *et al.*, 2016; Castro, *et al.* 2017; USEPA, 1986).

El riesgo potencial de efectos no carcinógenos por el efecto combinado (todos los metales pesados) de la exposición crónica, vía ingestión, se calculó mediante el Índice de Riesgo (HI), que es la suma de los HQ (Martín *et al.*, 2016):

$$HI \text{ (efecto crónico)} = HQ_{\text{metal 1}} + HQ_{\text{metal 2..}} + HQ_{\text{metal n}} \text{ (ec.3)}$$

Riesgo para efecto Cáncer.

El riesgo de cáncer asociado con la exposición oral (ingesta), se calculó utilizando la siguiente ecuación (Martín *et al.*, 2016; Castro *et al.*, 2017a; Castro *et al.*, 2017b):

$$CRI = CDI \times SF \text{ (adimensional)} \text{ (ec.4)}$$

donde CRI es la probabilidad de aparición de cáncer durante (toda la vida), como resultado de la exposición a un carcinógeno potencial (en el estudio Pb y Cr), CDI la Ingesta Diaria Crónica, y SF el factor de pendiente de potencia carcinógena (SF, en sus siglas en inglés Slope Factor).

El riesgo de cáncer por la exposición del conjunto de metales potencialmente carcinogénicos se calculó sumando los RIC de cada metal para subgrupo de la población (Martín *et al.*, 2016; USEPA, 1986)

$$CRI_{total} = CRI_{metal\ 1} + CRI_{metal\ 2..} + CRI_{metal\ n} \text{ (ec.5)}$$

El límite generalmente aceptable del incremento de riesgo cancerígeno individual es de 1×10^{-6} , es decir, la probabilidad de que un individuo desarrolle cáncer por cada millón de personas. Sin embargo, para el riesgo correspondiente a más de una sustancia (mezclas) en lugares contaminados se consideran aceptables niveles de exposición que resultan en un incremento de cáncer entre 10^{-4} y 10^{-6} , y se utiliza generalmente como punto de referencia 1×10^{-5} (Martín *et al.*, 2016; USEPA, 1986). Se aplicaron factores de corrección ajustados a la edad (ADAF, por sus siglas en inglés de Age Dependent Adjustments Factors) a los valores de las pendientes de potencia carcinogénica (SF) para agua, recogidos en la base de datos de U.S. EPA-IRIS, conforme a los siguientes criterios

Para niños < 2 años: valor de SF x 10

Para niños 2 -16 años: valor de SF x 3

Para adolescentes > 16 años: valor SF x 1.

X. RESULTADOS

10.1 Componente Medioambiental.

10.1.1 Contaminación del Río Atoyac en época de sequía-lluvia (2016).

Las características hidrológicas del río presentaron marcadas variaciones entre sequía y lluvia (Tabla 3 y Figura 7). La DQO se duplicó en la época seca (260.60 mg/L) y alcanzó valores que clasifican al cuerpo de agua como “altamente contaminado” ($DQO > 200$ mg/L) según la Escala de Clasificación de Calidad del Agua (ECCA) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los valores de DBO_5 y CT (Coliformes Totales) se incrementaron en un 50%. El Análisis de Componentes Principales (ACP) (Figura 8) demostró la relación positiva entre la DQO, DBO_5 , y los CT, y la relación inversa entre estos tres indicadores de contaminación, con respecto a la precipitación.

En época de lluvias se registraron aguas más turbias, coloreadas, y relativamente más oxigenadas, el río es más caudaloso y turbulento. Las tres variables se encontraron positivamente asociadas, pero solo la turbidez y el color registraron una correlación significativa (Tabla 2). Aunque las concentraciones de O_2 en las aguas superficiales presentaron valores relativamente superiores en lluvia (de hasta 3 mg/L de O_2), el valor medio no excedió a los 2 mg/L, encontrándose por debajo del Límite Máximo Permisible (LMP) para la Protección de Vida Acuática (5 mg/L) según la CE-CCA-001/89. Las bacterias mesofílicas aeróbicas (BMA) se correlacionaron positivamente con la turbidez, el color y el O_2 , coincidiendo sus picos en lluvia (Tabla 3).

El agua del Atoyac se caracterizó por su alcalinidad (pH=8) y temperaturas que fluctúan, más en época de sequía, entre 20°C. Se registró correlación positiva (significativa) entre los valores de pH y CT. En relación a los metales pesados, el Fe y el Al registraron valores superiores a los LMP para para la Protección de Vida Acuática (PVA) (LMP: Al=0.05 mg/L y Fe= 1 mg/L), según CE-CCA-001/89, en ambas

temporadas, y para el Riego agrícola (RA) (LMP Fe=5 mg/L) en el caso del Fe en época lluviosa (~5.92mg/L). El Cd y Ni, mostraron valores significativamente mayores en sequía, pero estos, al igual que el resto de los metales, no rebasaron los LMP indicados en las NOMs. Con base en el ACP, el Cd y Ni se relacionaron positivamente con el Cr y Zn, con tendencia a incrementarse en temporada seca. Lo mismo se observó con Al y Fe y con Pb en época de lluvia.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos y valores de significancia de la Prueba Kruskal-Wallis en el análisis en lluvia y sequía, en el Río Atoyac.

Parámetros	Temporada de lluvia			Temporada de sequía			K.Wallis P-valor
	Media	Min-Max	DS	Media	Min-Max	DS	
TURB (UNT)	234.41	106 – 460	115.50	102.20	59 – 136	26.70	0.00*
Color (1/m)	35.42	16.40 – 65	14.70	19.40	14.30 – 24.20	3.80	0.00*
T (°C)	20.25	19 – 22	0.97	19.94	17.8 – 23	2.21	0.29
pH	8.02	7.60 – 8.40	0.21	8.21	7.80 – 8.70	0.28	0.00*
O ₂ (mg/L)	1.47	0 – 3.80	1.40	0.27	0 – 1.90	0.60	0.05*
DBO ₅ (mg/L)	69.79	40 – 115	22.52	105.00	75 – 210	34.89	0.00*
DQO (mg/L)	130.91	58 – 234	39.52	260.60	163 – 464	75.42	0.00*
CT	246 868	44 497 – 6.00E ⁵	1.8E ⁵	357 539	83 557 – 6.00E ⁵	2.0E ⁵	0.10
BMA	1.08E ⁸	2.47E ⁷ – 4.09E ⁸	1.5E ⁸	2.96E ⁷	6.09E ⁶ – 6.56E ⁷	8.6E ⁷	0.07
Al (mg/L)	4.807	0 – 21.16	7.13	2.131	0 – 20.72	5.21	0.50
Fe (mg/L)	5.928	0.77 – 16.5	4.84	3.388	0.93 – 16.5	4.19	0.00*
Zn (mg/L)	0.056	0 – 0.156	0.04	0.067	0 – 0.133	0.03	0.16
Ni (mg/L)	0.007	0 – 0.056	0.01	0.023	0 – 0.1	0.027	0.03*
Pb (mg/L)	0.019	0 – 0.07	0.02	0.008	0 – 0.03	0.009	0.28
Cr (mg/L)	0.015	0 – 0.067	0.022	0.028	0 – 0.178	0.046	0.26
Cu (mg/L)	0.017	0 – 0.089	0.020	0.014	0 – 0.067	0.022	0.38
Cd (mg/L)	0.000	-	-	0.004	0 – 0.011	0.005	0.00*

Nota: estadísticos descriptivos y p-valor de la prueba de Kruskal-Wallis en lluvias y sequía; Río Atoyac n = 39; SD = Desviación estándar S /* p < 0.05 diferencia significativa entre estaciones. CT en NMP/100 mL y BMA in UFC/100 mL. CT: coliforms totales; TURB: turbidez; BMA: bacterias mesofílicas aerobicas.

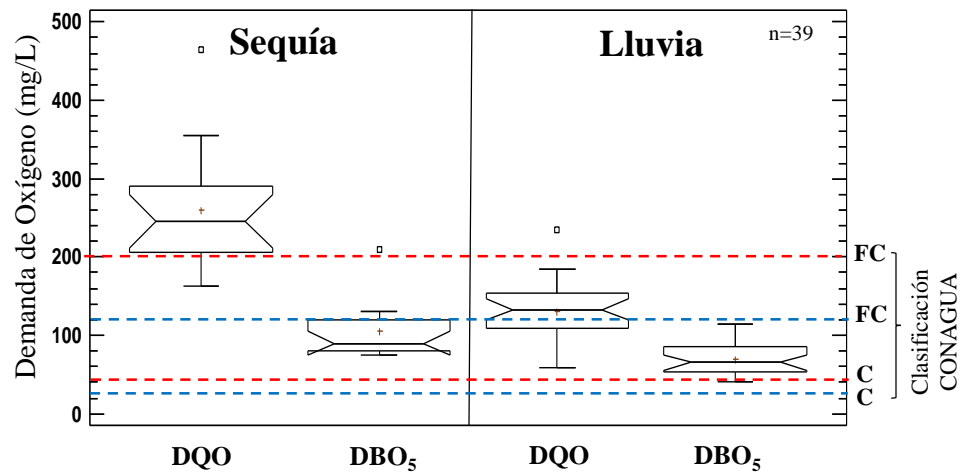


Figura 7. Valores promedios de DQO y DBO₅ en el Río Atoyac, en época de Sequía y Lluvia. *FC=Fuertemente contaminado, C=Contaminado. Límites para DQO en líneas rojas, para DBO₅ líneas azules.

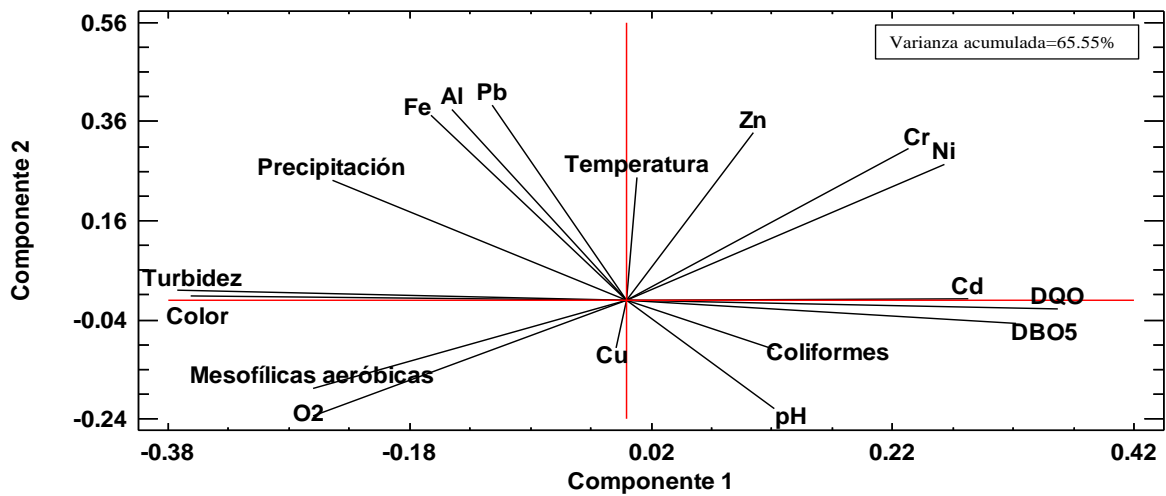


Figura 8. Análisis de Componentes principales considerando las variables físicas, químicas, bacteriológicas del Río Atoyac y niveles de precipitación para el año 2016.

Tabla 4. Matriz de correlación de las variables físico-químicas y bacteriológicas del Río Atoyac (Kendall Rank).

(n=39)	DBO ₅	DQO	O ₂	TURB	Color	BMA	CT	pH	T°C	Al	Fe	Cr	Pb	Ni	Zn	Cd	Cu
DBO ₅	1.00																
DQO	0.73*	1.00															
O ₂	0.06	-0.20	1.00														
TURB	-0.33	-0.60	0.60	1.00													
Color	-0.33	-0.60	0.60	1.00*	1.00												
BMA	-0.20	-0.46	0.73*	0.86*	0.86*	1.00											
CT	0.20	0.20	0.33	0.20	0.20	0.33	1.00										
pH	0.20	0.20	0.06	-0.06	-0.06	0.06	0.73*	1.00									
T°C	0.33	0.33	0.20	0.06	0.06	0.20	0.33	0.06	1.00								
Al	-0.33	-0.33	0.06	0.46	0.46	0.33	-0.06	-0.33	0.33	1.00							
Fe	0.06	0.06	-0.06	0.06	0.06	0.20	0.06	-0.20	0.73*	0.60	1.00						
Cr	0.46	0.46	-0.20	-0.33	-0.33	-0.20	0.20	-0.06	0.60	0.20	0.60	1.00					
Pb	0.00	0.00	-0.13	0.27	0.27	0.13	-0.27	-0.55	0.41	0.41	0.55	0.41	1.00				
Ni	0.07	0.35	-0.50	-0.35	-0.35	-0.21	0.21	-0.07	0.21	0.21	0.50	0.64	0.29	1.00			
Zn	0.06	0.06	-0.06	0.06	0.06	0.20	0.33	0.06	0.46	0.60	0.73*	0.60	0.27	0.64	1.00		
Cd	0.18	0.36	-0.73	-0.73	-0.73	-0.73	-0.18	0.00	-0.36	-0.18	-0.18	0.18	-0.28	0.49	0.00	1.00	
Cu	0.07	-0.07	0.50	0.35	0.35	0.50	0.78*	0.50	0.21	0.21	0.07	0.21	-0.37	0.07	0.35	-0.19	1.00

*Correlación significativa ($p < 0.05$). TURB: Turbidez; BMA: Bacterias mesofílicas aeróbicas; CT: Coliformes totales

10.1.2 Contaminación del Río Atoyac a nivel espacial.

En la Tabla 5 se observa el patrón de incremento en la contaminación orgánica (DBO₅ y DQO) y bacteriológica desde la represa Covadonga (Z1) hasta EPG (Z3). Sin embargo, las diferencias espaciales no fueron significativas de acuerdo a la prueba de Kruskal-Wallis, lo que indica que el caudal se encuentra igualmente contaminado en toda su extensión, incluido el efluente que se desvía hacia Emilio Portes Gil (EPG). En el estudio se registraron densidades promedios de Coliformes Totales (CT) entre 1.86E⁵ a 3.02E⁵ NMP/100 mL, alcanzando hasta 2.6E⁵ NMP/100 mL de coliformes de origen fecal (CF), cifra que supera sustancialmente el Límite Máximo Permisible (LMP) para riego agrícola (<1000 NMP/100 mL) de acuerdo a CE-CCA-001/89. Se identificaron 11 especies de bacterias patógenas oportunistas gram-negativas, pertenecientes a las familias 1) Enterobacteriaceae (*Morganella morganii*, *Enterobacter cloacae*, *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca*, *Klebsiella pneumoniae*, *Hafnia alvei*, *Kluyvera* sp., *Pantoea* sp.) 2) Pseudomonadaceae (*Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas* sp.), y 3) Xanthomonadaceae (*Stenotrophomona maltophilia*).

Se observa que la turbidez, el color, el pH, O₂ y las bacterias mesofílicas aeróbicas (BMA), muestran el mismo patrón de incremento desde Z1 a Z3, y son estadísticamente significativo el incremento en Z3, para el pH, O₂ y las BMA. El pH osciló alrededor de 8 indicando la condición básica del agua. La temperatura del agua superficial registró valores significativamente más bajos en la represa Covadonga Z1 (19.17°C), con respecto a las zonas Z2 y Z3. De los ocho metales que se detectaron en el agua, seis presentaron concentraciones superiores en la Z2 (represa Echeverría), y fueron significativas (pruebas Kruskal-Wallis y Tamhane) para Al, Zn, Ni y Pb, con incrementos del 468%, 100%, 355% y 409% respectivamente, el Al excedió los LMP para la PVA y el RA según CE-CCA-001/89.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos y P valores en el análisis espacial, del Río Atoyac.

Parámetros	Zona 1	Zona 2	Zona 3	K.Wallis P-Valor	Prueba Tamhane Diferencias
	R. Covadonga Media	R. Echeverría Media	Canal de Riego Media		
TURB (UNT)	151.06	190.20	203.66	0.172	-
Color (1/m)	25.23	29.79	32.27	0.053	-
T (°C)	19.17	20.97	20.26	0.004*	Z1≠Z2,Z3
pH	8.04	7.98	8.14	0.000*	Z3≠Z2,Z1
O ₂ (mg/L)	0.52	0.49	2.32	0.000*	Z3≠Z2,Z1
DBO ₅ (mg/L)	87.00	78.66	94.58	0.128	-
DQO (mg/L)	179.33	180.60	215.5	0.429	-
CT	1.86E ⁵	2.84E ⁵	3.09E ⁵	0.092	-
BMA	3.03E ⁷	6.69E ⁷	8.05E ⁷	0.031*	Z3≠Z2,Z1
Al (mg/L)	1.11	7.73	1.62	0.039*	Z2≠Z1,Z3
Fe (mg/L)	2.96	7.50	4.00	0.128	-
Zn (mg/L)	0.038	0.088	0.050	0.007*	Z2≠Z1,Z3
Ni (mg/L)	0.006	0.025	0.005	0.029*	Z2≠Z1,Z3
Pb (mg/L)	0.008	0.028	0.003	0.004*	Z2≠Z1,Z3
Cr (mg/L)	0.013	0.033	0.011	0.081	-
Cu (mg/L)	0.006	0.019	0.026	0.063	-
Cd (mg/L)	0.002	0.002	0.000	0.354	-

n=39; D.S= Desviación Estándar/ *p<0.05 diferencia significativa entre zonas. CT, CF en NMP/100mL y BMA en UFC/100mL. TURB: Turbidez; BMA: Bacterias mesofílicas aeróbicas; CT: Coliformes totales.

10.1.3 Contaminación generada entre 2011-2016 (Río Atoyac).

En la Tabla 6, se presentan los datos correspondientes a la calidad del agua en el 2011 publicados en la Declaratoria del río Oficial 2011, los resultados de la presente investigación, de la RNM del 2016 y las metas de calidad indicadas en la Declaratoria para el plazo 2012-2015. Asimismo, se incluye los porcentajes de incremento para los parámetros que registraron alzas en el período 2011-2016.

Al comparar los valores de DBO₅ y DQO del año 2011 con los obtenidos 5 años después (2016) se observa que la DBO₅ se mantuvo prácticamente constante en el tiempo (<3%), sin embargo, la DQO presentó un incremento superior al 22% (estudio) y 71% (RNM). Las concentraciones de Al y Fe se incrementaron en un 885%, y 1000% respectivamente. El resto de los metales no excedieron los LMP de la Declaratoria, sin embargo, se registra un aumento del 5% en el Pb y 815% en Cd, lo que indica el

aporte adicional en el tiempo. Aunque en la Declaratoria no se incluye el valor de la carga bacteriana para el 2011, sí se especifica para el 2015, fijándose un valor inferior a las 1000 bacterias en 100 mL, lo cual estuvo muy lejos de cumplirse, pues se registraron densidades de CF de hasta 265631 NMP/100 mL en el agua del río.

Tabla 6. Comparación de datos entre la Declaratoria Oficial 2011, los resultados de la presente investigación, la RNM 2016 y la Declaratoria 2012-2015.

Parámetros	Declaratoria Datos 2011	RNM Datos 2016	Evaluación actual 2016	Declaratoria Meta 2012-2015
T °C	-	-	20	<35
pH	-	-	8	<6.5-8.5
CF NMP/100mL	-	19900	2.6E ⁵	<1000
DBO ₅ (mg/L)	84.54	82.64 (-)	87.33 (3%)	39.6
DQO (mg/L)	160.62	274 (71%)	195.75 (22%)	93.9
Cd (mg/L)	0.002	-	0.018 (815%)	0.004
Cu (mg/L)	0.032	-	0.012	0.06
Cr (mg/L)	0.025	-	0.002	0.05
Ni (mg/L)	0.098	-	0.063	0.60
Pb (mg/L)	0.009	-	0.015 (5%)	0.03
Zn (mg/L)	0.059	-	0.023	0.12
Al (mg/L)	0.563	-	4.42 (685%)	0.50
Fe (mg/L)	0.200	-	5.23 (2519%)	0.34

Parámetros en negrillas excedieron la capacidad de asimilación y dilución del río para el 2011, según la Declaratoria de Clasificación del río Atoyac. CT: Coliformes fecales.

10.1.4 Calidad de agua subterránea en la población de Emilio Portes Gil (Ocoyucan).

El manantial se encuentra ubicado a una altura de 1940 msnm al norte-este del poblado, y sus aguas registraron temperaturas por el orden de los 22 °C, un pH de 7, y valores de O₂ por el orden de los 2 mg/L. Los pozos tienen una profundidad de 10 a 20 m, la temperatura del agua entre 20-25°C, pH entre 7-7.8, y O₂ entre 2-4.5 mg/L.

La densidad promedio de CT en los pozos fue de 1000 NMP/100mL (Tabla 7), y se identificaron un total de 12 especies de bacterias, de la familia Enterobacteriaceae (*Serratia fonticola*, *Citrobacter freundii*, *Citrobacter braakii*, *Enterobacter* sp.,

Enterobacter cloacae, *Enterobacter amnigenus*, *Enterobacter aerogenes*, *Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca* y *Klebsiella pneumoniae*), y de la familia Aeromonadaceae (*Aeromonas hydrophila*, y *Aeromonas* sp.). En el agua del manantial, solo en agosto, se detectaron CF, y la presencia de dos especies bacterianas reportadas como patógenas oportunistas *Citrobacter freundii* y *Serratia ficaria*. Se detectó bacterias mesofílicas (~324 UFC/100mL). No se observó diferencias significativas en relación a las densidades bacterianas entre los pozos de las viviendas, de acuerdo a su ubicación espacial, ni entre sequía y lluvia.

En los pozos y en el manantial se detectó la presencia de 7 metales pesados de los 9 analizados en el agua. En ambos tipos de aprovechamiento, se observó una tendencia de aumento en la concentración de metales durante la temporada de sequía. Se registraron concentraciones superiores al 200% en relación a las mediciones en lluvia, en el agua de los pozos; siendo estadísticamente significativos para el caso del Fe, Zn, Ni, Pb y Cu. Al comparar las concentraciones obtenidas con los estándares de calidad para uso y consumo humano, se observa que las concentraciones de Fe, Ni y Al en los pozos, exceden los límites máximos permisibles (LMP) con base en alguna de las normas mexicanas. El Pb registró valores promedio, ligeramente superiores (0.012 mg/L) al LMP según la NOM-127-Modificada 2000 (LMP=0.01 mg/L); en algunas de las muestras se midieron concentraciones hasta de 0.052 mg/L, es decir, cinco veces mayor al LMP. La concentración del resto de los metales (Zn, Cu, Cr) se mantuvo por debajo del LMP. Con respecto al manantial, se observó el mismo patrón de incremento en la temporada seca para todos los metales detectados, siendo significativas para el Cu, Fe y Zn. El Fe en el manantial registró concentraciones superiores al LMP, al igual que el Pb, particularmente en sequía, según las NOM-127.

Tabla 7. Valores promedios, de la Prueba Kruskal-Wallis en el análisis en época de lluvia y sequía, y valores de referencia, Pozos y Manantial.

Parámetros	Pozos (n=15)			Manantial (n=5)			NOM-127 ⁺	CE
	Lluvia	Sequia	P-Valor	Lluvia	Sequia	P-Valor		
T (°C)	20.70	22.56	0.001*	21.33	23	0.006*	-	-
pH	7.30	7.6	0.000*	7.20	7.37	0.240	6.5 – 8.5	5 - 9
O ₂ (mg/L)	2.98	3.42	0.181	2.00	1.83	0.108	-	4
CT	1378	1078	0.290	16	0	0.121	2	-
CF	549	104	0.308	15	0	0.317	No D	1000
BMA	114734	57067	0.404	314	374	0.486	-	-
Al (mg/L)	0.016	0.108	0.150	0	0.014	0.102	0.20	0.02
Fe (mg/L)	0.107	0.682	0.010*	0	0.418	0.001*	0.3	0.3
Zn (mg/L)	0.004	0.033	0.009*	0	0.022	0.001*	5	5
Ni (mg/L)	0.003	0.024	0.019*	0	0.003	0.102	-	0.01
Pb (mg/L)	0.000	0.012	0.000*	0.003	0.013	0.142	0.01	0.05
Cr (mg/L)	0.001	0.002	0.721	0.002	0.011	0.363	0.050	0.05
Cu (mg/L)	0.001	0.030	0.000*	0	0.036	0.001*	2	1

* p < 0.05 Diferencias significativas entre estaciones. CT, CF en NMP/100mL and BMA en UFC/100mL.

+NOM-127 (Modificación de DOF 2000).

10.2 Componente Humano.

10.2.1 Información demográfica y socioeconómica.

La población de E. Portes Gil, de acuerdo con los resultados, está compuesta en su mayoría (Figura 9), por individuos adultos (54%), seguidamente por niños (24%) y adolescentes (16%). En cuanto a la distribución por género, la población femenina es ligeramente más numerosa (57%) que la masculina (43%).

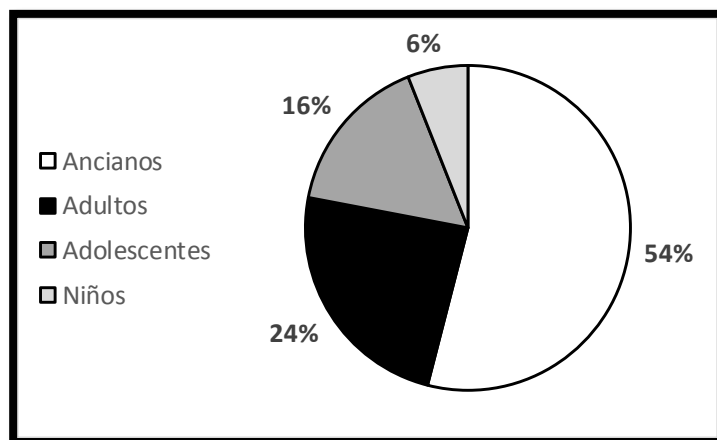


Figura 9. Distribución en porcentaje de los grupos etarios de la población E.Portes Gil.

La base económica de la población de E. Portes Gil es la agricultura. La principal fuente de ingresos por familia, proviene de la venta de hortalizas y especies ornamentales (Tabla 8 y Figura 10) que se cultivan en la zona. El 36% de las familias (viviendas) dependen exclusivamente de la venta de las cosechas, mientras que un 23% obtienen recursos adicionales a la venta de cultivos, mediante el trabajo de jornaleros, el comercio o la venta de productos derivados del ganado. Una minoría de familias obtiene sus ingresos a través de otros oficios, tales como: transportista, labores de aseo, trabajo en campo, o son pensionados de la Comisión Federal de Electricidad.

Tabla 8. Especies cultivadas en la Localidad de E. Portes Gil

Hortalizas	Ornamentales	Forraje	Otras
Hierba buena	Aster	Alfalfa	Nopal
Cilantro	Solidago		Aguacate
Tomate			
Cebolla			
Calabaza			
Maíz			
Ejote			



Figura 10. Fotografías de algunas especies que se cultivan en E. Portes Gil.

10.2.2 Agua para consumo humano y sistema de drenaje.

La localidad cuenta con una red (tubería) que distribuye a toda la localidad el agua potable, la cual proviene de un manantial que se encuentra en la zona norte del pueblo, sin embargo, el servicio no es diario. De acuerdo a la encuesta, un 50% de las viviendas cuentan con agua del manantial de 3 a 5 días de la semana, mientras que el otro 50% de las viviendas reciben agua menos de 3 días de la semana. En cuanto al uso que se le da a esta agua, en la mayoría de los casos (70% de las viviendas), la utilizan para el aseo personal, limpieza del hogar, para cocinar y elaborar alimentos, para los animales y para consumo personal. Tan solo un 17% de las familias (viviendas) hierven previamente el agua que proviene de la tubería.

Las familias resuelven el problema de la irregularidad en el servicio del agua, almacenándola en tanques de polietileno y/o extrayendo agua de pozos profundos. El 70% de las viviendas poseen un pozo particular, y en su mayoría (57%) un tanque adicional, mientras que un 30% de las viviendas no disponen de pozo sino de un tanque almacenador de agua.

Con la ingesta del agua del pozo son más precavidos en cuanto a las medidas sanitarias en relación al agua del manantial, ya que muchas familias prefieren no ingerir el agua del pozo (41% viviendas), y muchas de las que la ingieren, la hierven previamente (57% viviendas). No obstante, en la mayoría de los casos (88% de las viviendas) los pozos no reciben ningún tratamiento para la purificación de las aguas, a pesar de que, según una habitante de la localidad, la Secretaría de Salud les distribuye “pastillas de cloro” para el tratamiento de los mismos.

El agua de la red y de los pozos no es utilizada para el riego de los cultivos en ninguno de los casos, ya que estos son regados exclusivamente con el agua proveniente del Río Atoyac. Los habitantes de E. Portes Gil se refieren al agua del río como el “agua negra o sucia que corre por la canaleta” (Figura 11). No obstante, el lavado de las cosechas no se realiza con el agua de las canaletas, sino con el agua de los pozos o de los tanques almacenadores.

A pesar de que los campesinos saben que las aguas de las canaletas son residuales, solo algunos se protegen con guantes o tapa boca durante sus jornadas de trabajo (Figura 12).

En cuanto a las aguas negras, todas las viviendas están conectadas a un sistema rudimentario de cloacas, las cuales finalmente, son vertidas a las barrancas.



Figura 11. Canales y canaletas por donde circula el agua residual del Río Atoyac.



Figura 12. Habitantes de EPG en su jornada laboral.

10.2.3 Enfermedades infecciosas y no infecciosas.

En casi la mitad de las viviendas encuestadas (43%) algún miembro de la familia padece de una enfermedad crónica. De las personas enfermas, el 77% fueron mujeres de edades comprendidas entre los 36 a los 66 años. La diabetes y los problemas renales fueron las enfermedades preponderantes (44% y 22% respectivamente). La hipertensión, los problemas en el hígado, la espasticidad (enfermedad congénita), y los problemas de la tiroides también fueron reportadas.

A diferencia de las enfermedades crónicas, las enfermedades infecciosas, tal como la diarrea y la gripa, prevalecieron en la población infantil, reportándose en más del 57% de las viviendas encuestadas. También se reportaron algunas enfermedades de la piel, como hongos, y alergias, tanto en niños como en adultos.

10.2.4 Evaluación de riesgo debido a la ingesta del agua subterránea en EPG.

Riesgo para efecto No cáncer

El riesgo de enfermedades no cancerígenas por la ingesta crónica de metales pesados presentes en el agua del manantial y en los pozos es mayor para los niños en relación a los adultos (Tabla 9 y 10; Figura 13); esto se evidencia a través de los valores de los Cocientes de Peligro (HQ), así como en los Índices de Riesgo (HI).

Al comparar el riesgo en la salud asociado con la exposición oral del conjunto de metales (HI) procedente de los pozos y el manantial, se observa que el riesgo es mayor por la ingesta del agua del manantial, debido principalmente al valor relativamente alto del Cociente de Peligro para el cromo (HQ). No obstante, en ninguno de los casos el riesgo se considera alto pues los HQ fueron menores que 1.

Tabla 9. Coeficientes de Peligro (HQ) e Índices de Riesgo (HI) por la ingesta del agua de los pozos, en la subpoblación de niños, adolescentes y adultos de E. Portes Gil.

Metales pesados	Pozos Media			Pozos Lluvia			Pozos Sequía		
	HQ	Niños	Adol.	Adultos	Niños	Adol.	Adultos	Niños	Adol.
Al	0.009	0.005	0.004	0.002	0.001	0.001	0.016	0.009	0.008
Fe	0.012	0.007	0.005	0.003	0.002	0.001	0.020	0.012	0.010
Zn	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
Ni	0.014	0.008	0.007	0.003	0.002	0.001	0.025	0.015	0.012
Pb	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.007	0.004	0.003
Cr	0.010	0.006	0.005	0.007	0.004	0.003	0.014	0.008	0.007
Cu	0.009	0.005	0.004	0.001	0.000	0.000	0.017	0.010	0.008
∑HQ= HI	0.059	0.035	0.028	0.017	0.010	0.008	0.102	0.060	0.047

Adol: Adolescentes.

Tabla 10. Coeficientes de Peligro (HQ) e Índices de Riesgo (HI) por la ingesta del agua del manantial, en la subpoblación de niños, adolescentes y adultos de E. Portes Gil.

Metales pesados	Pozos Media			Pozos Lluvia			Pozos Sequía		
	HQ	Niños	Adol.	Adultos	Niños	Adol.	Adultos	Niños	Adol.
Al	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
Fe	0.006	0.004	0.003	0.000	0.000	0.000	0.012	0.007	0.006
Zn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001
Ni	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.003	0.002	0.001
Pb	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.008	0.004	0.004
Cr	0.045	0.027	0.021	0.014	0.008	0.007	0.077	0.045	0.036
Cu	0.010	0.006	0.005	0.000	0.000	0.000	0.020	0.012	0.009
∑ HQ= HI	0.070	0.041	0.033	0.016	0.009	0.007	0.124	0.073	0.058

Adol: Adolescentes

Al comparar los HI (índice que expresa el riesgo por el efecto combinados de los metales) entre las temporadas de estudio, se observa que éste, es notablemente mayor en la época seca, tanto por el consumo de agua de los pozos como por el agua del manantial, detectándose una mayor diferencia entre la magnitud del riesgo entre sequía y lluvia, para el subgrupo de los niños en comparación con el subgrupo de los adultos; esto sugiere que aunque el riesgo es más alto en época de sequía para los tres subgrupos evaluados, para los niños se agudiza más aún.

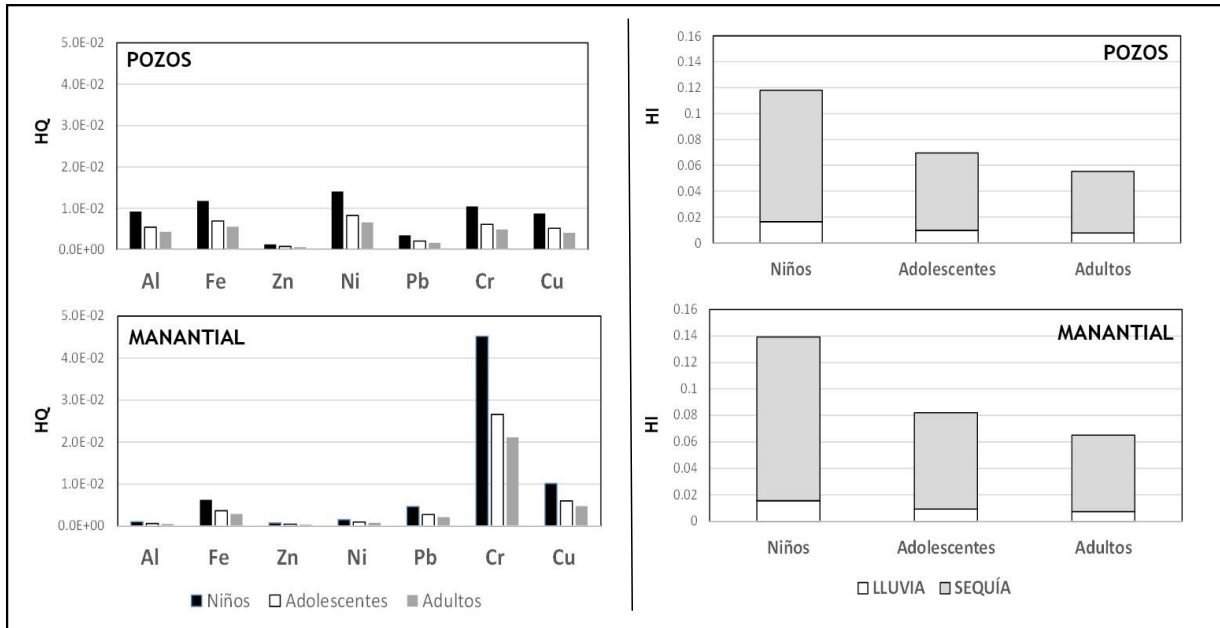


Figura 13. Coeficientes de Peligro (HQ) e Índices de Riesgos (HI) debido a la ingesta de agua de los pozos y el manantial, considerando los diferentes subgrupos poblacionales (niños, adolescentes y adultos) y las temporadas (lluvia y sequía).

Riesgo para efecto Cáncer

En la Tabla 11 y Figura 14, se aprecia que el riesgo de enfermedades cancerígenas es mayor por la ingesta prolongada de agua del manantial, en comparación con el agua de los pozos, particularmente para los niños, lo cual se explica por la presencia de mayores concentraciones de plomo y cromo en dicha fuente de abastecimiento. Dichos riesgos se acentúan en la temporada de sequía, principalmente en el subgrupo de los niños. El CRI (Índice de Riesgo de Cáncer) obtenido para el subgrupo de los niños con el agua del manantial, arrojó un valor que puede considerarse crítico (USEPA 2015).

Tabla 11. Índices de Riesgo de cáncer considerando el efecto individual y total de los metales potencialmente cancerígenos presentes a del manantial y los pozos, para la subpoblación de niños, adolescentes y adultos de E. Portes Gil.

Metales pesados	Niños		Adolescentes		Adultos	
	Manantial	Pozos	Manantial	Pozos	Manantial	Pozos
CRI						
Cromo	3.2E ⁻⁴	7.5E ⁻⁵	3.9E ⁻⁵	9.2E ⁻⁶	3.1E ⁻⁵	7.3E ⁻⁶
Plomo	6.8E ⁻⁶	5.1E ⁻⁶	8.0E ⁻⁷	6.0E ⁻⁷	7.0E ⁻⁷	5.0E ⁻⁷
ΣCRI_{total}	3.3E⁻⁴	8.0E⁻⁵	4.0E⁻⁵	9.8E⁻⁶	3.2E⁻⁵	7.8E⁻⁶

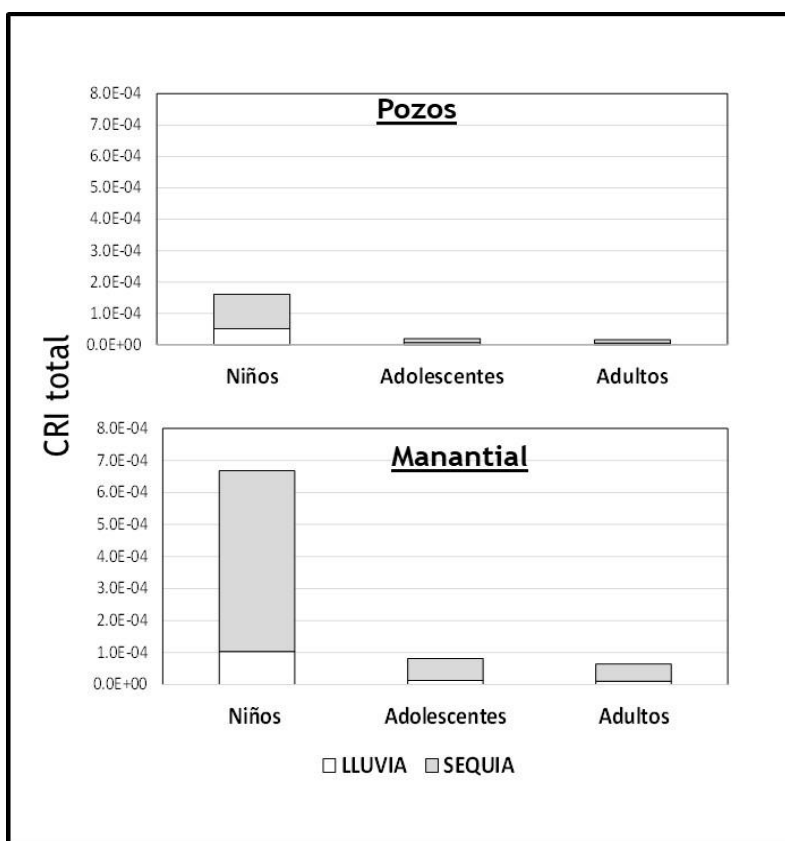


Figura 14. Índices de Riesgo de Cáncer Total debido a la ingesta de metales del manantial y los pozos, para la subpoblación de niños, adolescentes y adultos de E. Portes Gil.

XI. DISCUSIÓN

En el estudio se demuestra la marcada estacionalidad en las condiciones hidrológicas del Río Atoyac: incremento en los niveles de Ni, Cd, DBO₅ y DQO en la temporada seca, y en lluvias, en la turbidez, color, pH, Fe y O₂. El patrón de variación estacional en las características del río es típico para este tipo de ecosistemas donde la precipitación y el caudal, afectan los valores de muchos parámetros del agua por el proceso de dilución y turbulencia (Martínez-Tavera *et al.* 2017; Silva-Gómez *et al.*, 2002; Olgún-Muñoz *et al.*, 2010; López *et al.*, 2007).

Según Martínez-Tavera *et al.* (2017) en el Río Atoyac en época de sequía y lluvia observaron la misma tendencia estacional, durante 2013-2014, con respecto a la DBO₅, DQO, y O₂, y son similares en comportamiento a los resultados del presente estudio. En Silva-Gómez *et al.* (2002) también se observa el mismo patrón de variación estacional en los ríos de Atlixco, registrándose valores de Turbidez, pH y Fe mayores en verano (lluvia), en relación a lo observado en sequía, y los valores de DBO y DQO fueron mayores. Sin embargo, los valores de Fe registradas por estos autores en la época de lluvia oscilaron alrededor de 0.10 mg/L, valor mucho menor que el obtenido en el presente estudio (5.92 mg/L) esto indica el posible aporte antrópico por el incremento de la contaminación industrial (Guzmán *et al.*, 2011).

Se evidencia un alto grado de deterioro que presenta actualmente el Río Atoyac, por la contaminación orgánica y bacteriológica detectada, y la condición anóxica, independiente de la temporada y la zona evaluada, estos resultados coinciden con las apreciaciones de Huang *et al.* (2017) quienes observaron la disminución de oxígeno disuelto en los ríos urbanos, en los países en desarrollo, lo que produce fuertes tensiones en los ecosistemas acuáticos. Tal disminución se debe al proceso de descomposición bacteriana en presencia de una gran cantidad de compuestos orgánicos (SEMARNAT, 2016; Henze, 2008; Edokpayi *et al.* 2017). En el Río Atoyac, la carga orgánica proviene principalmente de las descargas de tres macroplantas municipales (Barranca del Conde, San Francisco y Atoyac Sur), que

según Rodríguez y Morales (2014), excedieron su capacidad de tratamiento desde 2010, por lo que la calidad de los vertidos es muy deficiente, sobre todo considerando que el tratamiento que reciben es primario, y dichas plantas incluyen aguas municipales y las provenientes del Parque Industrial Camino a San Lorenzo y Cuautlancingo (Declaratoria del Río Atoyac, 2011). La materia orgánica también proviene de los vertidos de industrias de diferentes giros (metalmecánica, autopartes, alimentos, farmacoquímica, automovilísticas, etc.) ubicadas en los márgenes del río (Sandoval *et al.*, 2009; Navarro *et al.* 2003; IMTA, 2005).

Con los actuales niveles de O₂ (~1.47mg/L), no es posible la supervivencia de la fauna acuática, salvo bacterias anaeróbicas o facultativas, o con bajos requerimientos de O₂, ya que valores menores a 5 mg/L generan un efecto adverso en peces y otros organismos acuáticos (Henze, 2008; Momba *et al.*, 2006). Al comparar los resultados obtenidos, con otros ríos urbanos de otros países, que fluyen por zonas metropolitanas (Wang *et al.*, 2012; Gyawali *et al.*, 2013; Goher *et al.*, 2014; Kiberia *et al.*, 2014; Ramavandi *et al.*, 2015; Damanik *et al.*, 2016; Jung *et al.*, 2016; Ali *et al.*, 2016) se concluye que la contaminación del Río Atoyac en la ciudad de Puebla es severa, en términos de DQO, DBO₅, CT, CF y la presencia de bacterias de alta patogenicidad.

Los análisis estadísticos, demuestran que la contaminación orgánica y bacteriológica es igual a lo largo del río (Tabla 3). Esto significa que el proceso de autodepuración típico de estos ecosistemas (dilución y asimilación) no se produce, posiblemente por la cantidad de efluentes residuales que se vierten a lo largo del río que exceden la capacidad natural buffer del ecosistema acuático (Edokpayi *et al.*, 2017; Dallas *et al.*, 1998).

La presencia de elevadas cantidades de coliformes totales en el río y en el canal de riego, manifiestan la deficiencia en el tratamiento de las aguas municipales, ya que muchas de las bacterias encontradas forman parte de la flora intestinal del humano (Burgos *et al.*, 2017; Ríos *et al.*, 2017), como lo demuestran las ocho Enterobacterias identificadas. La utilización del agua contaminada, por bacterias de

origen fecal, en riego agrícola se ha detectado en una variedad de estudios (Silva-Gómez *et al.*, 2002; Lesser *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2014); y es una constante en los ríos mexicanos que transitan por alguna zona rural-urbana (Muñoz *et al.*, 2012; Guzmán *et al.*, 2011; Rivera *et al.*, 2007) tal es el caso del Río Atoyac. Siete especies de Enterobacterias de importancia desde el punto de vista clínico (Burgos *et al.*, 2017; Ríos *et al.*, 2017) se aislaron de la corriente superficial de agua, las cuales producen infecciones en el sistema nervioso central y digestivo (*Escherichia*), en el tracto respiratorio inferior y torrente sanguíneo (*Klebsiella*, *Enterobacter*, *Escherichia*), y en el tracto urinario (*Escherichia*, *Klebsiella*, y *Morganella*) estos resultados coinciden con las determinadas en el Río Atoyac.

Se encontraron diferencias espaciales en los metales pesados; registrándose concentraciones de Al, Zn, Ni, y Pb superiores a 100% en la Z2 en comparación con Z1 y Z3, esto se explica por la gran variedad y cantidad de efluentes residuales industriales que se vierten en el tramo Covadonga-Echeverría (IMTA, 2005). Asimismo, el río recibe contaminantes industriales transportadas por las corrientes del arroyo Atenco y el Río San Francisco, los cuales son tributarios o afluentes del Río Atoyac así como, las descargas de industrias textiles, metalmecánicas, metalúrgicas, química farmacéuticas, de alimentos, entre otras (IMTA, 2005; Declaratoria del Río Atoyac, 2011; DENUE, 2017). La contaminación por metales pesados se da porque a las aguas municipales e industriales no se les aplica tratamiento terciario en el que se retiran contaminantes específicos (INEGI, 2016), y según el IMTA en el 2005, el 78% de las industrias no cumplieron con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para alguno de los contaminantes básico como metales pesados. A nivel nacional se tratan el 49% de las aguas residuales municipales, y solo se remueve el 14% de la carga de contaminantes de los vertidos industriales (CONAGUA, 2016).

Desde el 2011 se señaló en la Declaratoria de Clasificación del Río Atoyac, que el cuerpo de agua no admitía carga adicional o incrementos en la concentración de muchos de los parámetros considerados en el documento (55%). Cinco años después, la condición del Atoyac es aún más grave. Se demuestra que la concentración de DQO, DBO₅, CF, Fe, Al, Pb, Cd, Zn y Cr es mayor (en todas, o

algunas, de las estaciones de muestreo) (Tabla 4) en comparación con el valor calculado en el 2011.

Asimismo, se confirma que 5 de estos parámetros (DQO, DBO₅, CF, Fe y Al) muestran valores muy por encima de las metas de calidad establecidas para la zona evaluada, superando la capacidad de asimilación y dilución del río para los mismos. Un incremento del 22 al 77% en DQO, se produjo en 5 años (2011-2016), lo que sugiere pensar que a la fecha se han vertido mayores cantidades de aguas residuales, sin el tratamiento adecuado, particularmente las de naturaleza industrial, cargadas en materia orgánica poco biodegradable, dado el mínimo incremento en la DBO₅ (3%) que representa la materia biodegradable. Estos resultados coinciden y se asocian con el crecimiento industrial en la región que fue de 35.7% desde el 2009 hasta el 2016 (DENUE, 2017; INEGI, 2014).

En la Declaratoria no se incluye el oxígeno disuelto; sin embargo, los datos de O₂ registrados en el 2007 por Sandoval *et al.* (2009), indican que la concentración de O₂ presentaba valores mayores (5.9-6.1 mg/L) sin embargo, Martínez-Tavera *et al.* (2017) en el 2014 y los valores reportados en la presente investigación, registran valores promedios de <2 mg/L, lo que indica el deterioro en la calidad del agua en el tiempo.

El Río Atoyac representa un riesgo a la salud humana. Densidades de CF de 265 631 NMP/100 mL, se encontraron en el agua superficial, cuando el LMP es de 200 NMP/100 mL, y la meta que se había establecido para el 2012-2015 era de < 1000 NMP/100mL. La RNM (Red Nacional de Monitoreo de la CONAGUA) reporta densidades > 24 000 NMP/mL para el año 2016. En relación a los metales pesados, las concentraciones de Fe (de hasta 16.5 mg/L) y Al (de hasta 21.16 mg/L) en el agua superficial, rebasaron los LMP para la Protección de Vida acuática (CE-CCA-001/89), así como, el LMP para riego agrícola en el caso del Fe en lluvias (5.92 mg/L). Dichos valores se incrementaron en más de 600% desde el 2011, y fueron sus concentraciones muy elevadas en relación a los registrados por el IMTA en el 2005, cuyo valor máximo encontrado en el cauce principal fue de 0.85 mg/L, en contraste

con el máximo actual de 16.50 mg/L. Concentraciones comparables de Al fueron medidas por el IMTA en el 2005, en las descargas residuales de industria farmacoquímicas, colectores y tenerías.

Rodríguez-Tapia *et al.* (2012) y Rodríguez y Morales (2014), señalan que la infraestructura de tratamiento debería aumentar de acuerdo con el incremento en la generación de aguas residuales al ritmo que la población crece, sin embargo, el crecimiento de las áreas urbanas se ha realizado de forma desordenada sin la planeación adecuada en la disposición de residuos y el tratamiento de las aguas residuales. Por lo tanto, en la región de la cuenca Alto Atoyac, el rápido crecimiento económico multiplicó la contaminación del agua, además de por lo mencionado, porque la autoridad responsable de aplicar la normatividad en cuanto a los estándares de calidad de los vertidos no aplica la reglamentación, y esta situación es aprovechada por las empresas que abaratan sus costos de producción, lo que promueve a su vez el establecimiento de más industrias.

Los problemas asociados con la contaminación del Río Atoyac son múltiples. Uno de los problemas es el deterioro de la calidad del agua de los pozos y fuentes de abastecimiento por la infiltración de la contaminación hacia los cuerpos de agua subterráneo (Rodríguez y Morales, 2014).

Las elevadas densidades de CF (104 – 549 NMP/100mL), las elevadas concentraciones de Fe y Al (>LMP para uso y consumo humano, NOM-127-SSA1-1994) en el agua de los pozos, y el incremento en la concentración de metales en la temporada de mayor requerimiento del agua del Atoyac para el riego, indican que existe una infiltración de los canales de riego hacia los pozos. Lesser-Carillo *et al.* (2011), solo detectan concentraciones sobre el LMP de Fe y Al en el canal de riego (0.30-2.20 mg/L) (0,35-3.06 mg/L), pero no en el agua de los pozos. En EPG, todos los pozos presentaron una elevada densidad de bacterias mesofilicas aeróbicas (1E5 UFC/100mL \pm 1,14E5) y contaminación fecal en menor o mayor grado con la presencia de especies de importancia patogénica (Burgos *et al.*, 2017; Ríos *et al.*, 2017; Puerta y Mateos, 2010) como: *E.coli*, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter*

aerogenes, *Enterobacter cloacae*, *Klebsiella oxytoca*, y *Klebsiella pneumoniae*, lo cual representa una amenaza a la población considerando que el agua utilizada para consumo humano y aseo personal debe ser libre de microorganismos causantes de enfermedades (Ríos *et al.*, 2017).

Ya desde el inicio de la investigación se sospechaba contaminación de estas fuentes de abastecimiento por la inquietud manifestada por los habitantes de E. Portes Gil en cuanto a la posible conexión entre el agua del Atoyac y la recarga de los pozos. Ellos notaron que el nivel en los pozos variaba en función del cierre o apertura de las compuertas que regulan el flujo del agua del Atoyac para el riego de cultivos. A mediados del estudio, se sumaron evidencias al respecto. En agosto del 2016 se produjo un derrumbe en el túnel Portezuelo que impidió en el paso del agua del Atoyac hacia el poblado por tres meses aproximadamente, y el nivel de los pozos bajo a niveles alarmantes según el jefe ejidatario.

La situación es preocupante, ya que el agua de los pozos es utilizada para uso y consumo humano y en el 88% de las viviendas, no realizan la cloración. En Silva-Gómez *et al.* (2002) se demostró que la contaminación bacteriológica en todos los pozos y manantiales evaluados en la región de Atlixco es por la filtración del agua del canal de riego. Los autores también registraron valores de AI superiores al LMP para consumo humano en un pozo cercano al Río Nexapa, en concentraciones de 0.23 mg/L. Los valores altos de AI y Fe, y en general de otros metales en las fuentes de agua de esta región, puede ser explicado por la presencia de los mismos en los suelos, ya que según Méndez-García *et al.* (2000), y Méndez-García *et al.* (1997), la acumulación de metales pesados en los suelos se ha incrementado por el riego con aguas cada vez más contaminadas procedentes de Río Atoyac; dichos suelos se han sometidos por más de 30 años al riego con el agua de este río. Méndez-García *et al.* (2000) mencionan que la concentración de Fe en suelo resalta en parcelas regadas con agua residual de los canales.

Los estudios donde demuestran la contaminación por componentes químicos del agua en pozos en el país (Brenes *et al.*, 2011; Peña *et al.*, 2014; Pérez *et al.*, 2003)

así como, por bacterias de origen fecal (Burgos *et al.*, 2017; Felix *et al.*, 2007; Ramírez *et al.*, 2009; Martínez *et al.*, 2013; Anduro *et al.*, 2017) son cada vez mayores. En el estudio de Lesser-Carillo *et al.* (2011) encontraron que la principal recarga de agua al acuífero del Valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego, lo cual indica que la recarga del acuífero se hace con parte del agua residual que conducen los canales de riego, registrándose en un 40% de los pozos contaminación por CF, en concentraciones del orden de 8 NMP/100mL, notablemente más baja que las estimadas en el estudio. En el 2016 se publicó en el Diario Oficial de la Federación, lo siguiente “con el uso intensivo de las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México y sus áreas conurbadas, utilizadas para riego, el acuífero recibe una recarga inducida muy importante de agua residual, lo que ha ocasionado problemas de contaminación química y bacteriológica en el agua subterránea”.

A pesar del beneficio que proveen los pozos en cuanto a la disponibilidad hídrica, éstos son vulnerables a la contaminación por una serie de factores (falta de asesoría de expertos para la correcta construcción y protección, poca profundidad de los mismos, etc.) (Chavéz-Valdéz *et al.*, 2013; OMS, 2007; Van der Wal, 2010; OMS, 2006). Además, muchos de estos pozos han sido perforados sin el permiso del gobierno, o título de concesión (dado lo complicado del trámite) y no están inscritos en el Registro Público de los Derechos de Agua (REPDA- CONAGUA). De manera que no se inspeccionan, y existe un desconocimiento total del estado en el que se encuentran, y no se aplican medidas de prevención sanitaria.

La ingesta de agua contaminada con patógenos, y/o contaminantes químicos, tal como los metales pesados, puede impactar fuertemente a la salud humana (Ríos *et al.*, 2017; OMS, 2006). Y aunque en el caso de estos elementos químicos, forman parte de la corteza terrestre y pueden estar naturalmente en el agua subterránea, su liberación o disponibilidad se encuentra fuertemente mediada por las actividades humanas.

Tanto la presencia, como el incremento de la concentración de los metales pesados en el agua subterránea, puede ser consecuencia de la contaminación antrópica a través de fuentes difusas (riego con agua servidas, agroquímicos) o fuentes puntuales (fugas en sistema de alcantarillado o de eliminación de desechos, vertederos, derrames accidentales de minerías, industrias, entre otras) (OMS, 2006; OMS, 2007; Banco Mundial 2007). Y representa una amenaza para las poblaciones que beben el agua de estos aprovechamientos, debido a los efectos citotóxicos, carcinogénicos, y mutagénicos que producen muchos de los metales pesados cuando ingresan al organismo, pues a pesar de que algunos son esenciales para la vida humana, se requieren en muy bajas y específicas concentraciones (Kavcar *et al.*, 2007; Marcovecchio *et al.*, 2007; Reyes *et al.*, 2016).

Cantidades significativas de metales pesados son liberadas al medio ambiente como subproductos de procesos industriales u otras actividades humanas (minería, agricultura, etc.). Estos elementos, luego de ser descargados a los ríos, pueden trasladarse a otros lugares y contaminar los suelos y otros cuerpos de agua. Las zonas rurales-agrícolas adyacentes a las grandes ciudades se encuentran en mayor riesgo de afectación de pozos por metales pesados, pues además de las deficiencias locales en la infraestructura de saneamiento y el uso de agroquímicos, están expuestas a los contaminantes procedentes de las urbes, que son transportados por ríos que atraviesan ambas zonas.

El Río Atoyac, en la región del Alto Atoyac, transcurre en 80% de su recorrido por el área metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT), y recibe las aguas residuales deficientemente tratadas de cientos de industrias de diferentes giros y de los municipios más poblados del estado. Muchas de las comunidades rurales adyacentes al río (cuenca abajo), utilizan el agua contaminada para la irrigación puesto que no disponen de fuentes de agua alternativa (Pérez-Castresana *et al.*, 2018). Se ha señalado que uno de los problemas asociados con la contaminación del Río Atoyac es el deterioro de la calidad del agua de los pozos y fuentes de abastecimiento de las comunidades aledañas, por la infiltración de la contaminación hacia los cuerpos de agua subterráneo (Rodríguez *et al.* 2014). En el caso de la localidad E. Portes Gil, la

contaminación de los pozos para consumo humano representa un riesgo inminente, ya que el agua del río Atoyac fluye a través de una red de canales alrededor del poblado, y es la primera zona agrícola en recibir el agua que se desvía en la represa Echeverría (Martínez y Palerm 2000).

Diversas metodologías científicas se han desarrollado para evaluar el riesgo de enfermedades cancerosas y no cancerosas usando ecuaciones basadas en la concentración de metales pesados en el agua potable, y la exposición crónica de los mismos tomando en cuenta las diferencias entre los grupos etarios tal como los pesos promedios y el volumen de agua potable ingerido diariamente (Martín-Olmedo *et al.*, 2016). Así el coeficiente de peligro (HQ), el Índice de Riesgo (HI), y el Índice de Riesgo de Cáncer (CRI), se han utilizado como una herramienta basada en ecuaciones propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA 1986).

La caracterización de riesgo realizada en el presente estudio, reveló que la población de E. Portes Gil se encuentra más susceptible al riesgo en la salud por la ingesta del agua del manantial que por la procedente de los pozos debido a la presencia de mayores concentraciones de cromo y plomo, metales entre los más peligrosos para la salud humana de acuerdo a la IARC (Agencia Internacional de Investigaciones de Cáncer, 2015). Una mayor cantidad de personas se expone a estos contaminantes ya que todas las viviendas (522 habitantes) reciben el agua de esta fuente de abastecimiento a través de un sistema de tuberías y la utilizan para beber, cocinar, el aseo, etc. Por el contrario, los pozos están presentes en el 68% de las viviendas, y no en todos los casos se bebe el agua de los mismos, solo en el 41% de las viviendas.

En la evaluación realizada, sobresale el potencial de riesgo en la salud por la exposición prolongada al cromo, registrándose valores de Índices de Riesgo de Cáncer (IRC), mayores al límite aceptable de 1×10^{-6} (USEPA 2015) para el subgrupo de los niños y adolescentes, particularmente durante la época seca (Pérez-Castresana *et al.* 2018).

Aunque el cromo forma parte de la corteza terrestre y puede liberarse al medio ambiente por fuentes naturales, su liberación está fuertemente mediada por procesos antropogénicos. El cromo es ampliamente utilizado en industrias tales como metalurgia, galvanoplastia, de pinturas y pigmentos, producción de textiles, curtido de cuero, conservación de la madera, producción química, de pulpa y papel, entre otras (Mohanty y Kumar, 2013; ATSDR, 2017). Estas industrias son en gran parte responsables de la contaminación del medio ambiente por el cromo, pues liberan dichos residuos a través de las aguas residuales (Ghani, 2011; ATSDR, 2017, Jaishankar *et al.* 2016).

En la Zona Metropolitana de Puebla-Tlaxcala (ZMPT) se encuentran cientos de industrias de diferentes giros con una importante representación (aprox. 80%) de aquellas que utilizan compuestos de cromo para sus procesos productivos o de manufactura, como las textiles, las metalmecánicas, de pinturas, automotrices, etc. (IMTA, 2005). Estas, al igual que el resto de las fábricas, no tratan sus aguas residuales de la forma adecuada para remover metales pesados y otros contaminantes químicos.

Así, en este río se descargan los desechos de la cuarta zona metropolitana más grande de México (ZMPT), y al mismo tiempo, las poblaciones agrícolas como E. Portes Gil, ubicadas en zonas más bajas de la cuenca, utilizan el agua contaminada del río para el riego de sus cultivos (Pérez-Castresana *et al.* 2018, y 2019). Ghani (2011) señala que una liberación continua de cromo se lleva a cabo en las prácticas agrícolas modernas, debido al uso de fertilizantes, y al riego con aguas residuales. Ambas actividades se realizan de manera intensiva en la zona de estudio, pues además de los agroquímicos, se riega exclusivamente con el agua contaminada del Río Atoyac.

Esto puede explicar las elevadas concentraciones de cromo en los suelos de E. Portes Gil reportados en el 2016 por Ávila González, cuyos valores fueron tres veces superior al límite permisible para suelos agrícolas, con base en la norma que establece los criterios para los cuales se considera un suelo contaminado, y otros

estándares (NOM-147SEMARNAT/SSA1-2004). Resalta el hecho de que en la investigación de Castro-González *et al.* (2017), sobre los riesgos por la exposición a metales pesados en poblaciones localizadas en la cuenca del Alto Atoyac, se haya identificado al cromo presente en los suelos, como el metal responsable del riesgo de enfermedades en los hombres debido a la exposición dérmica crónica, ya que diariamente y durante todo el año, su piel (manos, cara, pies) se encuentra en contacto con la tierra por las actividades de labranza, cosecha, entre otras, las cuales realizan sin ningún equipo de protección.

Aparte de la contaminación de los suelos por la retención del cromo y otros metales pesados debido al uso de aguas residuales y fertilizantes (Fytianos *et al.* 2001; Singh *et al.* 2010; Bielicka *et al.*, 2005) también puede producirse la contaminación del agua subterránea (Bielicka *et al.*, 2005; Conagua, 2011). En E. Portes Gil, esto representa una posibilidad, ya que el agua contaminada del Río Atoyac fluye a través de cientos de canales de riego alrededor del poblado, y los pozos son poco profundos (10-20 m) (FAO, 2017).

Los efectos en la salud de los compuestos de cromo pueden variar con la ruta de exposición. Por ejemplo, los efectos respiratorios están asociados con inhalación de compuestos de cromo, pero no con exposiciones orales y dérmicas, y efectos gastrointestinales se asocian principalmente con la exposición oral. En general, los principales órganos blancos para la acción tóxica del cromo son bronquios, tracto gastrointestinal, hígado y riñón (ATSDR, 2012).

En la evaluación se detecta que los niños son más vulnerables al riesgo en la salud, en cuya etapa existe una mayor predisposición a la acumulación de metales pesados en relación a la población adulta, debido a que ingieren un mayor volumen de agua por unidad de peso corporal, y la absorción de químicos es mayor que en las personas adultas debido al subdesarrollo de su tracto digestivo, y se acumulan en el hígado, los riñones, los huesos y, principalmente, en el cerebro causando diferentes trastornos de salud (Dorea y Donangelo, 2006; Solis *et al.*, 2009).

Los efectos de la exposición a cualquier sustancia peligrosa dependen de la dosis, la duración, la forma en que están expuestos, los rasgos y hábitos personales, y de la presencia o ausencia de otros productos químicos (ATSDR, 2017). Además de la presencia de cromo en el agua subterránea, también se detectó plomo, registrándose en algunas muestras de los pozos, concentraciones mayores a límite máximo permisible para consumo humano.

El plomo a diferencia del cromo y de los otros metales analizados, no es requerido para el metabolismo humano, por lo que no deja de representar un peligro en el caso de que ingrese vía oral al organismo, aún en bajas cantidades (USEPA; ATSDR). En el estudio de González-Castro *et al.* (2017) se consiguió Pb sobre el límite máximo permisible de los estándares de la Unión Europea y de la FAO/OMS en la leche de vaca alimentada con pasto regada con el agua del Río Atoyac.

El plomo y las aleaciones de plomo son componentes comunes de cañerías, baterías, pesas, proyectiles y municiones, revestimientos de cables y láminas usadas para protegernos de la radiación. El principal uso del plomo es en baterías para automóviles y otros vehículos. Los compuestos de plomo se usan como pigmentos en pinturas, en barnices para cerámicas y en materiales de relleno. El plomo se encuentra en el ambiente en forma natural. Sin embargo, la mayoría de los niveles altos que se encuentran en el ambiente se originan de actividades humanas. Los niveles ambientales de plomo han aumentado más de mil veces durante los tres últimos siglos como consecuencia de la actividad humana (ATSDR, 2017).

Un aspecto importante que se debe considerar es que los índices estimados, solo aportan información de la magnitud de riesgo asociada con la exposición oral a metales pesados contenidos en el agua de consumo, es decir, de una de las principales rutas y vías de exposición (agua subterránea/vía oral). Esto implica que aun cuando para la mayoría de los metales pesados, el HQ <1 significa seguro, hay que considerar que la exposición al metal pesado puede darse también, a través de otras vías de exposición, como la ingestión de plantas contaminadas, ya que la

mayoría de las plantas pueden absorber y bioacumular los contaminantes del suelo (Castro *et al.*, 2017a; Ackova, 2018).

En consecuencia, la salud humana se ve directamente afectada por el consumo de estas plantas, ya que no hay un mecanismo de excreción poderoso (Ghosh *et al.*, 2012). En el estudio de Latif *et al.* (2018) se muestra como vegetales regados con aguas residuales difieren en su potencial para acumular metales, registrándose concentraciones de Cr superior al límite permitido por la FAO en espinacas, calabazas, berenjenas, etc.

En la localidad de E. Portes Gil se cultivan diversas especies vegetales para consumo humano como calabazas, perejil, cilantro, entre otras, de manera que los riesgos a los que se encuentran expuestos los habitantes de esta localidad agrícola, probablemente sean mayores, por lo que los valores de los índices calculados pueden no ser lo suficientemente bajos para permitir exposiciones adicionales y, por lo tanto, para proteger a la salud humana. Un buen ejemplo de ello se muestra en Li (2018 a y b) donde el autor señala que, dado que la exposición humana a los pesticidas se puede llevar a cabo por diferentes rutas, es necesario analizar exhaustivamente los factores de caracterización del riesgo total para la salud, sumando los factores de caracterización calculados a partir de la exposición al suelo, el agua potable y los alimentos agrícolas.

Asimismo, señalan que es importante considerar la relación entre dichos procesos para el establecimiento de los valores estándar individuales de pesticidas (por ejemplo, en el agua subterránea), ya que de lo contrario pueden no ser lo suficientemente bajo para tolerar exposiciones adicionales y, por lo tanto, para proteger a la salud humana. En virtud de estas consideraciones y de nuestros resultados, es preciso que en la localidad agrícola E. Portes Gil se tomen medidas de remediación, ya que los riesgos para la salud humana podrían ser mayores al considerar otras posibles vías de exposición.

En E. Portes Gil la situación de contaminación, implica un alto riesgo en la salud, pero también repercute negativamente en la economía de las familias, ya que,

en el centro de comercialización (Central de Abastos), les pagan poco por sus cosechas debido a la procedencia de las mismas y al agua utilizada. Ellos saben que, hay restricciones en cuanto a las especies que podrían sembrar por la calidad de agua, pero necesitan diversificar sus cultivos para incrementar sus ganancias y producir su comida.

El incremento en la contaminación produce impactos negativos que dañan a la población, a las actividades económicas y los ecosistemas aledaños. De acuerdo con la evaluación de los daños por la contaminación del Río Atoyac realizada por Rodríguez *et al.* (2012) la contaminación del río está provocado una contracción en la producción agrícola, ganadera, pesquera y turística, así como pérdida del bienestar general de la población, al experimentar afectaciones a la salud, disminución de los ingresos familiares, reducción de actividades recreativas, e incluso ya se observa el fenómeno de migración por causas ambientales.

La elevada contaminación que enfrenta el Río Atoyac se explica porque la autoridad responsable de aplicar la normatividad vigente para las descargas de aguas residuales no aplica su reglamentación (a las descargas industriales y municipales), siendo esto aún más peligroso en lo que se refiere a descargas de contaminantes peligrosos. Esta situación es aprovechada por las empresas, que abaratan sus costos de producción, y las localidades urbanas, que se ahorran los costos de tratamiento de sus aguas al verterlas sin tratamiento (Rodríguez *et al.*, 2012).

La problemática del Río Atoyac, revela la deficiencia en la gestión de los gobiernos con distintos niveles de competencia en el control de la contaminación. Para los municipios, el aspecto ambiental no es prioritario; el gobierno estatal no resiste la presión de la industria que no quiere incrementar sus costos, y el gobierno federal no tiene la capacidad de vigilar el cumplimiento de descargas en cuerpos de agua de jurisdicción federal (Rodríguez y Morales, 2011).

XII. CONCLUSIONES

- El Río Atoyac en la ZM de Puebla se encuentra severamente contaminado y el agua no cumple con los estándares para la protección de vida acuática según CE-CCA-001/89 y PROY-NOM 001-SEMARNAT-2017.
- El sistema acuático muestra una marcada estacionalidad en la calidad del agua, así como en la concentración de contaminantes, registrándose valores mayores en época de sequía.
- Se registró un incremento en la contaminación del Río Atoyac en un período de 4 años (2011-2016), al comparar los datos obtenidos en el presente estudio (2016) con los datos publicados en el 2011 en la Declaratoria de Clasificación del río.
- El uso del agua del Río Atoyac para el riego de cultivos representa una amenaza a la salud pública ya que ésta no cumple con los estándares para dicho uso según CE-CCA-001/89, debido a las grandes cantidades de bacterias de origen fecal y a los contaminantes químicos, los cuales pueden infiltrarse hacia el manto acuífero.
- Se evidencia las fuentes de abastecimiento de agua en EPG se encuentran contaminadas, y que la ingesta por los habitantes implica un riesgo particularmente en el período de sequía que es cuando existe un mayor flujo del agua contaminada del Río Atoyac.
- El riesgo potencial por la ingesta colectiva de metales (HI) (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr), presentes en el agua, es mayor en niños, particularmente en época de sequía.

- El índice de riesgo de cáncer por la exposición oral del Cr, fue encontrado mucho mayor en niños que el límite aceptable (10^{-6}), particularmente por la ingesta del agua del manantial.
- De total de metales (Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr), el Cr, fue el principal contribuyente al potencial adverso en la salud de los habitantes.

XIII. RECOMENDACIONES

- Impulsar la participación conjunta y coordinada de las instituciones de los distintos órdenes de gobierno y de la sociedad, para incrementar la eficiencia en la gobernanza en torno al agua que contribuya con la reducción de la contaminación del Río Atoyac. En relación a esto, será necesario que se produzcan cambios en las políticas y reformas legales, que apunten a la descentralización en la gestión del agua, y se dé una mayor participación a las comunidades.
- Fortalecer la gobernabilidad mediante acciones de vigilancia e inspección, así como la aplicación de sanciones en materia de vertidos.
- Regular el establecimiento de nuevas industrias en la Cuenca del Alto Atoyac hasta no resolver los problemas de saneamiento de las aguas residuales, sobre todo considerando los daños que este sector ha generado en el ambiente y en la salud humana.
- Impulsar acciones para incrementar y mejorar el tratamiento de las aguas, así como la implementación de ecotecnologías para el pretratamiento de aguas residuales a nivel del hogar como estrategia preventiva para reducir la contaminación.
- Reemplazar en EPG el cultivo de especies de consumo humano por el riesgo que representa el uso agrícola de agua contaminada, y/o en su defecto cultivar especies de tallo largo para evitar el contacto con el agua residual, y que además se procesen industrialmente para su consumo.

- Aplicar medidas de desinfección de los pozos para evitar el riesgo de enfermedades infecciosas causadas por las enterobacterias, o hervir el agua antes de su consumo, particularmente en la temporada seca.
- Implementar un sistema de agua potable alternativo, como la recolección de agua de lluvia para disminuir el grado de dependencia del agua subterránea.
- Ampliar la escala de análisis de la problemática de contaminación a nivel de Cuenca hidrográfica, considerando que es la unidad mínima de gestión a partir de la cual pueden surgir propuestas de recuperación viables.
- Evaluar la problemática relacionada con la contaminación del Río Atoyac profundizando en las causas desde el punto de vista socio-económico e institucional.

XIV. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackova, D.G. Heavy metals and their general toxicity on plants. *Plant Sci. Today* 2018, 5, 14–18.
- Agua.org.mx. Centro virtual de información del agua. Fundación Gonzalo Río Arronte, I.A.P. Disponible en <http://www.agua.org.mx/>
- El agua en México. FUSDA. Disponible en: (<http://www.fusda.org/revista11pdf/Revista11%205ELAGUAENMEXICO%20.pdf>)
- Alcalá, M. Descripción en bosquejo de la Imperial, Cesárea, Muy Noble y Muy Leal Ciudad de Puebla de los Ángeles. Junta de Mejoramiento Moral, Cívica y Material del Municipio de Puebla, México, 1992.
- Aledo, A. (s/f). La crisis ambiental y su interpretación sociológica. En Tema Desastres Ambientales. TYCEA-BLE. <http://docplayer.es/1374186-La-crisis-ambiental-y-su-interpretacion-sociologica.html>
- Ali, M.M.; Ali, M.L.; Islam, M.; Rahman, M. 2016. Preliminary assessment of heavy metals in water and sediment of Karnaphuli River, Bangladesh. *Environ Nanotechnol Monit Manag.* 5, 27–35.
- Anduro, J.A.; Cantú, E.; Campas, O.; López, J.; Sánchez, D.; Félix, A. 2017. Diagnóstico de la calidad sanitaria del agua de pozo en comunidades del sur de Sonora, México. *RESPYN.*16, 1.
- APHA. Standard methods: for the examination of water and wastewater; 21a ed., American Public Health Association, EUA. 2005.
- Arellano, O.; Solís, S.; Serrano, L.; Morales, E.; Méndez, A.; Montero, R. 2015. Use of the Zebrafish Embryo Toxicity Test for Risk Assessment Purpose: Case Study. *J FisheriesSciences.com.* 2015, 9(4), 052-062.
- Arjen van der Wal. Understanding groundwater y Wells, in manual drilling Instruction handbook for manual drilling teams on hydro-geology for well drilling, well installation and well development. 2010. Published by the PRACTICA Foundation.
- ATSDR. 2011. Departamento de Salud y Servicios humanos de los EEUU. Washington (USA): Servicio de Salud Pública, 269 pp.
- ATSDR, 2012. Public health Statement Chromium.

- ATSDR. 2013. The Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, GA. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/>
- ATSDR. (<https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp7.pdf><https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp7.pdf>)
- Ayala Rodríguez, I. (2009). La Situación ambiental en Puebla: Elementos para la educación. Universidad Iberoamérica Puebla. México. 317 pp.
- Bermúdez de Castro, D. 1980. Teatro Angelopolitano o historia de la Ciudad de Puebla, México. Junta de Mejoramiento Moral, Cívica y Material del Municipio de Puebla, México, 1980.
- Bielicka A, Bojanowska I, Wisniewski A. 2005. Two Faces of Chromium-Pollutant and Bioelement. *Pol J Environ Stud* 14(1): 5–10.
- Bonilla, M.; Ayala, A.; González, S.; Santamaría, J.; Silva, S. Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 “Valsequillo” para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*. 2015, 3.
- Bhargava, P.; Gupta, N.; Vats, S.; Goel, R. Health Issues and Heavy Metals. *Austin J Environ Toxicol*. 2017, 3(1): 1018.
- Bravo, L., Sánchez, J.J., Izurieta, J.L., Tomasini, A., Evaluación toxicológica del río Atoyac, Pue., y su relación con los parámetros fisicoquímicos. Segundo Congreso Nacional AMICA, 2015.
- Brenes, R.; Cadena, A.; Ruiz, R. Monitoreo de la concentración de nitrato en el acuífero del Valle de Puebla. *Rev. Int. Contam. Amb*. 2011, 27, 313-321.
- Burgos, A.L.; Alvarado, M.; Páez, R.; Hernández, R. Patrones espacio temporales de la condición microbiológica del agua de fuentes comunitarias y amenazas a la salud familiar en cuencas estacionales del Bajo Balsas (México). *Rev. Int. Contam. Ambie*. 2017, 33 (2), 199-213.
- Carabarán, A. 2000. Agua y confort en la vida de la antigua Puebla, México. Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades, BUAP, México, 2000.
- Castro, N.P.; Moreno, R.; Calderón, F.; Moreno, A.; Juárez, M. 2017a. Assessment risk to children’s health due to consumption of cow’s milk in polluted areas in Puebla and Tlaxcala, Mexico. *Food additives and Contaminants. Part B*: 2-7.
- Castro, N.P.; Calderón, F.; Moreno, R.; Moreno, A; Tamariz, J.V. 2017b. Health risks in rural populations due to heavy metals found in agricultural soils irrigated

with wastewater in the Alto Balsas sub-basin in Tlaxcala and Puebla, Mexico. International Journal of Environmental Health Research.1369-1619.

- Cisneros, X.; González, J.; Fuentes, C. 2001. Perspectiva de aprovechamiento de las aguas residuales en la agricultura. IMTA, CONAGUA.
- Cisneros, X.; Zatarain, F.; Fuentes, C.; Pulido, L.; Díaz, J. Diagnóstico del uso de aguas residuales en la agricultura en México. Coordinación de Riego y Drenaje, IMTA, México, 2008.
- CE-CCA-001/89. Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas; DOF, México, 1989.
- CEMDA. El agua en México: Lo que todas y todos debemos saber (2006). Fondo para la comunicación y la educación Ambiental, A.C. Centro mexicano de derecho Ambiental, A.C., Presencia Ciudadana Mexicana A.C. Disponible en: (http://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2011/12/agua-mexico_001.pdf).
- Chávez, M.; Rivera, G.; Romero, T., Vizcarra, I. 2013. El pozo: usos, seguridad y tradición en la subcuenca del río San Javier. Estudios Sociales.
- CONAGUA (2008). Diagnóstico del uso de aguas residuales en la agricultura en México.
- CONAGUA (2010). Manual para el manejo de zonas de riego con agua residuales.
- CONAGUA (2015). Atlas del Agua en México 2015.
- CONAGUA. Atlas del Agua en México 2016, México, 2016. http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf
- CONAGUA. Escala de clasificación de los cuerpos de agua superficiales, México. <http://files.conagua.gob.mx/transparencia/CalidaddelAgua.pdf>
- CONAGUA. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego Año Agrícola 2013-2014; SEMARNAT, México, 2015.
- CONAGUA. Red Nacional de Monitoreo (RNM) datos 2016, México. RNM-CONAGUA, México. <http://catalogo.datos.gob.mx/dataset/red-nacional-de-monitoreo-de-la-calidad-de-las-aguas-nacionales>
- CONAGUA. Red Nacional de Monitoreo 2012-2015 (RNM), México. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145523/Calidad del Agua Superficial-2012_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/145523/Calidad_del_Agua_Superficial-2012_2015.pdf)

- Comisión Nacional de Derechos Humanos, Recomendación por Contaminación del río Atoyac, núm. 10 /2017 <http://bit.ly/2tqyt1r>
- Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica del Estado de Puebla (CEIGEP), México, 2017. <http://www.coteigep.puebla.gob.mx/>
- Comité Vive Atoyac. 2018. Diagnóstico para la formulación del Plan Rector para el rescate del río Atoyac. Ayuntamiento de Puebla.
- Dallas, H.; Day, J.A.; Musibono, D.E.; Day, E.G. (1998). Water quality for aquatic ecosystems: tools for evaluating regional guidelines. WRC Report. 1998, 626, 240.
- Damanik, M.N; Lock, K.; Boets, P.; Everaert, G.; Nguyen, T.H.; Forio, M.; Musonge, P.; Suhareva, N.; Bennetsen, E.; Landuyt, D.; Domínguez, L.; Goethals, P. Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *Limnologia*. 2016, 57, 27–59.
- Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac, Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes; DOF, México, 2011.
- Diario Oficial de la Federación. ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle del Mezquital, clave 1310, en el Estado de Hidalgo, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México; DOF, México, 2016.
- Diario Oficial de la Federación. ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas; DOF, México, 2010.
- Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- Dorea JG, Donangelo CM. 2006. Early (in uterus and infant) exposure to mercury and lead. *Clin Nutr*. 25:369–376.
- Edokpayi, J.; Odiyo, J.; Durowoju, O. Impact of Wastewater on Surface Water Quality in Developing Countries: A Case Study of South Africa, *Water Quality*; Ed., InTech, 2017. <https://www.intechopen.com/books/water-quality/impact-of-wastewater-on-surface-water-quality-in-developing-countries-a-case-study-of-south-africa>
- FAO, http://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm).

- FAO. Reutilización de las aguas en la agricultura: ¿Beneficios para todos?; Informe sobre temas hídricos, FAO, Roma, 2013.
- Félix, A.; Campas, O.; Aguilar, M.; Meza, M. Calidad microbiológica del agua de consumo humano de tres comunidades rurales del sur de sonora (México). RESPYN. 2007, 8, 3.
- Flores C.; Vikolainen, V.; Bressers, H. Water Governance Decentralisation and River Basin Management Reforms in Hierarchical Systems: Do They Work for Water Treatment Policy in Mexico's Tlaxcala Atoyac Sub-Basin? *Water*. 2016, 8(5), 210.
- Foladori, G, y Tommasino, H. 2012. La solución técnica a los problemas ambientales. En *Revista Katálysis* [en línea] 2012, 15 (Enero-Junio). Disponible en: <<http://redalyc.org/articulo.oa?id=179622787008>> ISSN 1414-4980
- Fytianos K, Katsianis G, Triantafyllou P, Zachariadis G. 2001. Accumulation of heavy metals in vegetables grown in an industrial area in relation to soil. *Bull Environ Contam Toxicol*. 67(3):423–430.
- Gamboa, L. 1985. Los empresarios de ayer: el grupo dominante en la industria textil de Puebla, 1906-1929; UAP, México, 1985.
- Ghani A. 2011. Effect of chromium toxicity on growth, chlorophyll and some mineral nutrients of *Brassica juncea* L. *Egyptian Acad J Biol Sci* 2(1): 9–15.
- Ghosh, A.K.; Bhatt, M.; Agrawal, H. Effect of long-term application of treated sewage water on heavy metal accumulation in vegetables grown in Northern India. *Environ. Monit. Assess*. 2012, 184, 1025–1036.
- Greenpeace México, Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac, la historia de negligencia continua, 2014. <http://bit.ly/2smZVh5>
- Goher, M.E.; Hassan, A.L.; Abdel, I.A.; Fahmy, A.H.; El-sayed, S.M. Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal, Nile River, Egypt. *Egypt J Aquat Res*. 2014, 40, 225–233.
- González, J.A. El control del agua en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan por el estado mexicano posrevolucionario. *Anduli*. 2009, 8, 169–190.
- González Ladrón de Guevara, F. 2007. Aportes para la caracterización de las Ciencias Ambientales. En libro *Las Ciencias Ambientales una nueva área de conocimiento*. Red Colombiana de Formación Ambiental. Pp 1-182.

- Guzmán, G.; Ramírez, E.M.; Thalasso, F.; Rodríguez, N.; Guerrero, A.; Avelar, F.J. Evaluación de contaminantes en agua y sedimentos del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes. *Universidad y Ciencia*. 2011, 27(1), 17-32.
- Gyawali, S.; Techato, K.; Monprapussorn, S.; Yuangyai, C. Integrating landuse and water quality for environmental based land use planning for U-tapao River Basin, Thailand. *Procedia Soc Behav Sci*. 2013, 91, 556–563.
- Henze, M. *Biological Wastewater Treatment: Principles Modelling and Design*; Published by IWA Publishing, London, UK, 2008.
- Hernández, E.; Quiñones, E.; Cristóbal, D.; Rubiños, J. Calidad biológica de aguas residuales utilizadas para riego de cultivos forrajeros en Tulancingo, Hidalgo, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*. 2014, 20(1), 89-100.
- Huang, J.; Yin, H.; Chapra, S.; Zhou, Q. Modelling Dissolved Oxygen Depression in an Urban River in China. *Water*. 2017, 9, 520.
- INE: www.inecc.gob.mx/publicaciones/libros
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Estudio de clasificación del río Atoyac, Puebla-Tlaxcala; Informe final; CONAGUA, México, 2005.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala 2015; INEGI, México, 2015.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Puebla 2016; INEGI, México, 2016.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Encuesta Anual de la Industria Manufacturera: EAIM 2012: SCIAN 2007; INEGI, México, 2014.
- Jaishankar, M.; Tseten, T; Anbalagan, N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals *Interdiscip Toxicol*. Vol. 7(2): 60–72.
- Jiménez Cisneros, B.; Torregrosa, R.; Aboites. L. (2010). *El agua en México: cauces y encauces*. CONAGUA.
- Jung, K.Y.; Lee, K.L.; Im, T.; Lee, I.J.; Kim, S.; Han, K.Y.; Ahn, J.M. Evaluation of water quality for the Nakdong River watershed using multivariate analysis. *Environ Tech Innov*. 2016, 5, 67–82.

- Kakkar, P.; Jaffery, F. Biological markers for metal toxicity. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2005, 19 (2):335–349. DOI:10.1016/j.etap.2004.09.003.
- Kavcara, P.; Sofuoglub, A.; Sofuoglu, S. 2009. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 212, 216–227.
- Kibena, J.; Nhapi, I.; Gumindoga, W. Assessing the relationship between water quality parameters and changes in landuse patterns in the Upper Manyame River, Zimbabwe. *Phys Chem Earth.* 2014, 153–163.
- Latif, A.; Bilal, M.; Asghar, W.; Azeem, M.; Ahmad, M.I.; Abbas, A.; Admah, M.; Shahzad, T. Heavy Metal Accumulation in Vegetables and Assessment of their Potential Health Risk. *J. Environ. Anal. Chem.* 2018, 5, 234.
- Leit, H. *Las Calles de Puebla.* México. Junta de Mejoramiento Moral, Cívico y Material del municipio de Puebla, México, 1986.
- Les Ateliers. Documento de análisis-Puebla y su Zona Metropolitana, México, 2011.
- Lesser, L. E.; Lesser, J. M.; Arellano, S.; González, D. Balance hídrico y calidad del agua subterránea, Valle Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* 2011, 28(3), 323–336.
- Li, Z. The use of a disability-adjusted life-year (DALY) metric to measure human health damage resulting from pesticide maximum legal exposures. *Sci. Total Environ.* 2018, 438–456.
- Li,Z. A health based regulatory chain framework to evaluate international pesticide ground water regulations integrating soil and drinking water standards. *Environ. Int.* 2018, 1253–1278.
- López, M.; Ramos, M.G.; Carranza, J. Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el Río Lerma y Lago de Chapala, México. *Hidrobiologica.* 2007, 17, 17-30.
- Loreto, R. De aguas dulces y aguas amargas o de cómo se distribuía el agua en la ciudad de Puebla durante los siglos XVIII y XIX. In: *Limpiar y obedecer, la basura, el agua y la muerte en la Puebla de los Ángeles 1650-1925.* Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, México, 1994.
- Malik QA, Khan MS. 2016. Effect on Human Health due to Drinking Water Contaminated with Heavy Metals. *J Pollut Eff Cont* 5: 17.

- Marcovecchio, J.E., S.E. Botte and R.H. Freije, 2007. Heavy Metals, Major Metals, Trace Elements. In: Handbook of Water Analysis. L.M. Nollet, (Ed.). 2nd Edn. London: CRC Press, pp: 275-311.
- Martínez T.; Palerm, J. Antología sobre pequeño riego; Vol. II; Organizaciones Autogestivas, Colegio de Postgraduados; Plaza y Valdés, México, 2000.
- Martínez, C.; Huante, Y.; Santiago, I.; Sandoval, G.; Estrada, C.; Madrid, J. Diagnóstico de la calidad de agua de los pozos de Puerto Ángel, San Pedro Pochutla, Oaxaca. *Ciencia y Mar*. 2013, 50, 11-18.
- Martínez, E.; Rodríguez, P.F.; Shruti, V.C.; Sujitha, S.; Morales, S.; Muñoz N. Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environ Earth Sci*. 2017, 76-95.
- Martín-Olmedo P, Carroquino Saltó MJ, Ordóñez Iriarte JM, Moya J. 2016. La Evaluación de riesgos en salud. Guía metodológica. Aplicaciones prácticas de la metodología de Evaluación de riesgos en salud por exposición a químicos. Madrid. Sociedad Española de Sanidad Ambiental y Escuela Andaluza de Salud Pública. Serie "De aeribus, aquis et locis", nº 3.
- Méndez, T.; Flores, R.; Palacios, S. Disponibilidad de Cd, Fe, Mn y Pb en suelos agrícolas de Tecamachalco, Edo. de Puebla. *Memorias del XXVIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Tabasco, México, 1997.
- Méndez, T.; Rodríguez, L.; Palacios, S. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra Latinoamericana*. 2000, 277-288.
- Mendoza, M.; Quevedo, A.; Bravo, A.; Flores, H.; De la Isla de Bauer, M.; Reyes, F.; Zamora, B.P. Estado ecológico de ríos y vegetación riverena en el contexto de la nueva Ley General de Aguas de México. *Rev. Int. Contam. Ambie*. 2014, 30 (4), 429-436.
- MODIFICACION NOM-127-SSA1-94. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización; DOF, México, 2000.
- Mohanty M, Kumar Patra H. 2013. Effect of ionic and chelate assisted hexavalent chromium on mung bean seedlings (*Vigna Radiata* L. Wilczek. Var k-851) during seedling growth. *JSPB* 9(2): 232–241.

- Momba, M.; Osode, A.; Sibewu, M. The impact of inadequate wastewater treatment on the receiving water bodies-case study: Buffalo City and Nkokonbe Municipalities of the Eastern Cape Province. *Water SA*. 2006, 32, 5.
- Momodu, M; y Anyakora, C. Heavy Metal Contamination of Ground Water: The Surulere Case Study. *Research Journal Environmental and Earth Sciences* 2010, 2(1), 39-43. ISSN: 2041-0492.
- Montero, R.; Serrano, L.; Araujo, A.; Dávila, V.; Ponce, J.; Camacho, R.; Morales, E.; Méndez, A. Increased cytogenetic damage in a zone in transition from agricultural to industrial use: comprehensive analysis of the micronucleus test in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2006, 21(5), 335–342.
- Morales-Mejía, C. Tratamiento fotoquímico aplicado al agua residual de un hospital de la ciudad de Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. BUAP, 2016.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Estudio de clasificación del Río Atoyac, Puebla-Tlaxcala; Informe final; CONAGUA, México, 2005. 12.
- Muñoz, H.; Suárez, J.; Vera, A.; Orozco, S.; Battle, J.; Ortiz, A.J.; Mendiola, J. Demanda bioquímica de oxígeno y población en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Rev. Int. Contam. Amb.* 2012, 28, 27–38.
- Munyao, J.; Kimiti, J.; Njuru, P. 2017. Water Pollution in a Riparian Community: The Case of River Athi in Makueni County, Kenya. *JALSI*. 10 (3), 1-17.
- Navarro, I.; Flores, E.; Valladares, R. Evaluación ambiental y epidemiológica para identificar factores de riesgo a la salud por contaminación del Río Atoyac, México. UAM, México, 2003.
- NMX-AA-042-SCFI-2015. Enumeración de organismos coliformes totales, fecales y E.coli- Método del número más probable; DOF, México, 2015.
- NMX-AA-051-SCFI-2001. Determinación de metales pesados por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, método de Prueba; DOF, México, 2001.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales; DOF, México, 1997.

- Olguín, E.; González, R.; Sánchez, G.; Zamora, J.; Owen, T. Contaminación de ríos urbanos: El caso de la subcuenca del río Sordo en Xalapa, Veracruz, México. *Rev. Latinoam Biotecnol Amb Algal*. 2010, 1(2), 178-190.
- OMS Protecting Groundwater for Health Managing the Quality of Drinking-water Sources.2006.
- OMS. Chemical safety of drinking-water: Assessing priorities for risk management.2007.
- Peña, Y.; Santacruz de León, G.; Charcas, H. Calidad del Agua en pozos de la Red de Monitoreo del Acuífero del valle de San Luis Potosí, México. *Aqua-LAC*. 2014, 4, 49 - 59.
- Pérez, F.; Prieto, F.; Rojas, A.; Galán, C.; Marmolejo, Y.; Romo, Y.; Castañeda, A.; Rodríguez, J.A.; Barrado, E. Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán, Estado de Hidalgo, México. *Hidrobiológica*. 2003, 13(2), 95-102.
- Puerta, A.; Mateos, F. Enterobacterias. *Medicine*. 2010, 10(51), 3426-31.
- Ramavandi, B.; Farjadfard, S.; Ardjmand, M.; Dobaradaran, S. Effect of water quality and operational parameters on trihalomethanes formation potential in Dez River water, Iran. *Water Res Ind*. 2015, 11, 1–12.
- Ramírez, E.; Robles, E.; Sainz, M.; Ayala, R.; Campoy, E. Calidad microbiológica del acuífero de Zacatepec, Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Amb*. 2009, 25 (4), 247-255.
- Reyes, Y.; Vergara, I.; Torres, O.; Díaz, M., González, E. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*. 16 (2), 66-77.
- Ríos, S.; Agudelo, R.M.; Gutiérrez, L.A. Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*. 2017, 35(2), 236-247.
- Rivera, R.; Palacios, O. L.; Chávez, J.; Belmont, M. A.; Nikolski, I.; De la Isla de Bauer, M. L.; Guzmán, A.; Terrazas, L.; Carrillo, R. Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Amb*. 2007, 23, 69–77.

- Rodríguez, L.; Morales, J.; Zavala, P. Evaluación socioeconómica de daños ambientales por contaminación del río Atoyac en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 2012, 143-151.
- Rodríguez, L.; Morales, J. Contaminación del Atoyac, daños ambientales y tecnologías de mitigación. Primera Edición. UAM, México, 2014.
- Rodríguez, L.; Morales, J. (2011). Contaminación e internalización de costos en la industria textil. En *Revista Internacional de Ciencias Sociales y Humanidades, SOCIOTAM*, Vol. XXI, Núm. 1. México. Pp. 143-169.
- Sabater, S. y Elosegí, A. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Fundación BBVA. España. 21 pp.
- Sandoval, A.M.; Pulido, G.; Monks, S.; Gordillo, A.J.; Villegas, E.C. Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 2009, 34(12): 880-887.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México; Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. México, 2016.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. 2016. Compendio de Estadísticas Ambientales, México.
- SEGOG. Secretaría de gobernación/http://dof.gob.mx/diario_oficial_de_la_gobernacion.
- Silva, S.; Muñoz, O.; De la Isla de Bauer, M.; Infante G. Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1 Agua. *Terra Latinoamericana*. 2002, 20: 243-251.
- Singh A, Sharma RK, Agrawal M, Marshall FM. 2010. Health risk assessment of heavy metals via dietary intake of foodstuffs from the wastewater irrigated site of a dry tropical area of India. *Food Chem Toxicol*. 48(2):611–619.
- Sistema Meteorológico Nacional (SMN), México. <http://smn.cna.gob.mx/es/component/content/article?id=42>
- Sistema Nacional de Información Municipal (SNIM-2010) <http://www.snim.rami.gob.mx/>

- Solis C, Isaac-Olive K, Mireles A, Vidal-Hernández M. 2009. Determination of trace metals in cow's milk from waste water irrigated areas in Central Mexico by chemical treatment coupled to PIXE. *Microchemical J.* 91:9–12.
- Sperling, M.V. *Principios Básicos do Tratamento de Esgotos*, 4ª ed; Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, 2001.
- Thompson, T.; Fawell, J.; Kunikane, S.; Jackson, D.; Appleyard, S.; Callan, P.; Bartram, J.; Kingston, P. *Chemical safety of drinking-water: Assessing priorities for risk management* Chemical safety. World Health Organization. 2007. Printed in Geneva, Switzerland. ISBN 978 92 4 154676 8.
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 1986. Guidelines for the health risk assessment of chemical mixtures [R]. Washington (DC): US Environmental Protection Agency. ([EPA/630/R-98/002]). https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-11/documents/chem_mix_1986.pdf.
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 2011. *Exposure factors handbook: Edition*. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency. Disponible en: <http://www.epa.gov/ncea/efh/pdfs/efh-frontmatter.pdf>.
- USEPA (Environmental Protection Agency of the United State). 1992. *Guidelines for Exposure Assessment*. Washington (DC): US Environmental Protection Agency. (EPA/600/Z-92/001). Disponible en: <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=15263>
- USEPA. 2005. *Guidelines for Carcinogen Risk Assessment*. Disponible en: https://www3.epa.gov/airtoxics/cancer_guidelines_final_3-25-05.pdf
- Ventura, M.T. *La industrialización en Puebla, México, 1835-1976; Encuentro de Latinoamericanistas Españoles (12. 2006. Santandaer): Viejas y nuevas alianzas América Latina y España, 2006, s.l., España, 2006.*
- Wang, J.; Liu, X.D.; Lua, J. *Urban River Pollution Control and Remediation*. *Procedia Environmental Sciences.* 2012, 13, 1856 – 1862.