

RÍO ATOYAC:

HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL DE UNA
PROBLEMÁTICA MULTIFACTORIAL

COORDINADORES:

Carlos Alberto Ávila Orta

María de Lourdes Hernández-Rodríguez

S. Alejandro Lozano Morales

INFORMACIÓN DE LIBRE ACCESO



TLAXCALA
UNA NUEVA HISTORIA



CONACYT



El Gobierno de Tlaxcala



SEPE
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA DEL ESTADO



CITLAX

**RÍO ATOYAC:
HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL
DE UNA PROBLEMÁTICA
MULTIFACTORIAL**

DIRECTORIO

EL COLEGIO DE TLAXCALA, A. C.

Dr. Serafín Ríos Elorza
Presidente

Dr. Gerardo Suárez González
Secretario Técnico

Dr. Alfonso Pérez Sánchez
Director Académico

Dra. Ivonne Virginia Campos Rico
Secretaria de Investigación

L.A.E. Marco Antonio Ibarra Álvarez
Director Administrativo

Lic. Karen Janeth Tirado Portillo
Coordinadora de Comunicación Social

Mtro. Arturo Juárez Martínez
Coordinador Editorial



RÍO ATOYAC: HACIA UNA GESTIÓN INTEGRAL DE UNA PROBLEMÁTICA MULTIFACTORIAL

Carlos Alberto Ávila Orta
María de Lourdes Hernández-Rodríguez
S. Alejandro Lozano Morales

Coordinadores

Primera edición: 2021
Primera reimpresión: mayo 2022

Esta reimpresión fue financiada por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA).

®El Colegio de Tlaxcala, A. C.

El Colegio de Tlaxcala, A. C.
Melchor Ocampo No. 28
C.P. 90600, San Pablo Apetatitlán, Tlaxcala
Tel: (01 246) 46 4 58 74, 46 4 77 25, 46 4 77 26 Ext. 202
Correo electrónico: elcolegiodetlaxcala@coltlax.edu.mx
Diseño de forros: Alejandro Ángel López Abriz
Diseño de interiores: Rafael Cruz Sánchez

Publicado bajo la licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual (CC BY-SA), versión 4.0.

ISBN: 798-607-7673-75-0

Hecho en México
Made in Mexico



¡Copia este libro!

Este libro se publica bajo una licencia CC BY-SA, lo cual significa que usted puede copiarlo, redistribuirlo, remezclarlo, transformarlo y construir sobre su contenido para cualquier propósito, incluso comercial, mientras dé el crédito apropiado, provea un enlace a la licencia, e indique si se realizaron cambios. Si remezcla, transforma, o construye sobre el material, debe distribuir sus contribuciones bajo el mismo licenciamiento que el material original. Detalles de licenciamiento:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Compartir no es delito.

Instituciones participantes

CIQA. Centro de Investigación en Química Aplicada. Gregorio Cadenas Pliego, Herminia Soledad Cerda y Meneses, Raúl Herrera Mendoza

COLSAN. El Colegio de San Luis, A.C. Germán Santacruz de León

COLTLAX. El Colegio de Tlaxcala, A.C. Andrés María Ramírez, Ángel David Flores Domínguez, María de Lourdes Hernández-Rodríguez

CIDETEQ. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. Fernando Baquero Herrera, Víctor Hugo Rodríguez Obregón.

CIGA-UNAM. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental-Universidad Nacional Autónoma de México. Ángel G. Priego Santander

Investigador(a) CONACYT-CIDETEQ. Fernando Felipe Rivera, Yolanda Reyes Vidal

Investigador(a) CONACYT-CIQA. S. Alejandro Lozano Morales

Investigador(a) CONACYT-CIQA-CITLAX. Christian Javier Cabello Alvarado

Investigador(a) CONACYT-UNAM. Janete Morán Ramírez

IPICYT. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. José Alfredo Ramos Leal

ITAT-TNM. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala-Tecnológico Nacional de México. Juan José Castellón Gómez

UPTx. Universidad Politécnica de Tlaxcala. Wilfrido Gutiérrez Ortiz



Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y financiamiento de las siguientes instituciones y proyectos para llevar a cabo esta obra:

Gobierno del Estado de Tlaxcala

Secretaría de Educación Pública del Estado de Tlaxcala (SEPE)

El Colegio de Tlaxcala, A. C. (COLTLAX)

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)

Centro de Investigación y de Innovación del Estado de Tlaxcala
(CITLAX)

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Presidencia Auxiliar Municipal de San Mateo Ayecac, Tlaxcala

Autoridades e Integrantes del Ejido San Mateo Ayecac, Tlaxcala

Proyecto 296356

Consolidación del Consorcio de Investigación y de Innovación del Estado de Tlaxcala (CITLAX). Financiado por el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) del CONACYT

Proyecto TLAX-2018-01-01-43129

Diseño, construcción, equipamiento y puesta en marcha del Consorcio de Investigación Científica, Tecnológica y de Innovación del Estado de Tlaxcala. Financiado por el Fondo Mixto CONACYT - Gobierno del Estado de Tlaxcala



Índice

Prólogo	11
----------------	----

Oliverio Santiago Rodríguez Fernández, Serafin Ríos Elorza

Presentación	13
---------------------	----

Carlos Alberto Ávila Orta

SECCIÓN I. MARCO CONCEPTUAL

Capítulo 1. La contaminación del río Atoyac y sus efectos socio-ambientales en San Mateo Ayecac, Tlaxcala	25
--	----

María de Lourdes Hernández-Rodríguez

Capítulo 2. Caracterización físico-geográfica del paisaje en la microcuenca Atoyac-Xochiac, subcuenca Alto Balsas	55
--	----

Ángel David Flores Domínguez,

Ángel G. Priego Santander

SECCIÓN II. CALIDAD DEL AGUA, CONTAMINANTES Y FERTILIDAD DEL SUELO

Capítulo 3. Calidad del agua del acuífero Alto Atoyac, en el estado de Tlaxcala, para uso doméstico y agrícola	83
---	----

Germán Santacruz de León,

Janete Morán Ramírez,

José Alfredo Ramos Leal

Capítulo 4. Calidad del agua y contaminantes de la cuenca Alto Atoyac	113
--	-----

S. Alejandro Lozano Morales

Capítulo 5. Diagnóstico de la fertilidad del suelo y aporte nutrimental de las aguas del río Atoyac en el ejido San Mateo Ayecac, Tlaxcala	155
Juan José Castellón Gómez	

SECCIÓN III. DIMENSIONAMIENTO POLÍTICO, ECONÓMICO Y TECNOLÓGICO

Capítulo 6. Percepción y prácticas de agentes sociales en torno a la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal	185
Wilfrido Gutiérrez Ortíz	

Capítulo 7. Propuesta de un “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”	211
José Fernando Baquero Herrera, Víctor Hugo Rodríguez Obregón, Herminia Soledad Cerda y Meneses	

Capítulo 8. Alternativas tecnológicas potenciales para la regeneración de la cuenca Alto Atoyac	237
S. Alejandro Lozano Morales, Raúl Herrera Mendoza, Gregorio Cadenas Pliego, Yolanda Reyes Vidal, Fernando Felipe Rivera, Christian Javier Cabello Alvarado	

SECCIÓN IV. LA PROPUESTA DE ABORDAJE EPISTEMOLÓGICO

Capítulo 9. La contaminación del río Atoyac como problema perverso (<i>wicked problem</i>)	295
Andrés María Ramírez	

PRÓLOGO

La investigación colaborativa puede definirse como aquella que involucra la coordinación entre los investigadores, instituciones, organizaciones y/o comunidades. Esta cooperación puede aportar una experiencia distinta a un proyecto, como en este caso. Este libro representa el resultado del trabajo conjunto interinstitucional que aborda una problemática enraizada en la comunidad de San Mateo Ayecac, municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el cual se analiza, desde una perspectiva multidisciplinaria, el manejo inadecuado del río Atoyac, y propone, desde la visión de cada uno de los grupos de investigación, un modelo alterno de trabajo para solucionar los problemas generados a lo largo de los años.

En este enriquecedor ejercicio que finaliza con una propuesta basada en un enfoque transdisciplinario, hemos colaborado instituciones de distinta índole e involucrado a grupos de la sociedad, para atender demandas pertinentes y válidas para la comunidad, donde ésta juega un papel clave al ser el centro desde donde emanan las problemáticas, pero también desde donde la comunidad propone soluciones. Formas de trabajo en donde todos aprendemos, si bien, en muchas ocasiones las colaboraciones pueden ser una fuente frecuente de problemas, en este caso ha sido un proceso de aprendizaje y generación de valor que al paso del tiempo se irá perfeccionando.

Para el CIQA, participar en este tipo de dinámica es sumamente gratificante, de manera especial en este año en que el Centro cumple 45 años, mismos que le dan la madurez para migrar a estas nuevas formas de trabajo, compromiso que además ha asumido al plasmarlo en su visión, la cual incluye la promoción y fomento de la investigación colaborativa y transdisciplinaria. Si bien el libro está encaminado a la atención de una problemática específica, creemos que las lecciones que

se pueden aprender van más allá del problema en sí, lo que permitirá que los colaboradores generen procesos y dinámicas que puedan ser replicados en un futuro para abordar y atender otras problemáticas de la sociedad, bien sea del estado de Tlaxcala o de otras regiones del país.

En ese sentido, El COLTLAX y CIQA, como instituciones responsables de este ejercicio, creemos que las diferencias que se generan en un proceso de colaboración como son las culturales, de objetivos, hipótesis y de cualquier otra índole, pueden ser convertidas, como hasta ahora, en una fuente de oportunidades que permiten generar mayor diversidad de propuestas de solución, y la suma de las comunidades en la pertinencia de la investigación, a fin de que la ciencia y tecnología sirvan a la sociedad.

Dr. Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

Director General

Centro de Investigación en Química Aplicada

Dr. Serafin Ríos Elorza

Presidente

El Colegio de Tlaxcala, A.C.

PRESENTACIÓN

El Atoyac es una corriente superficial de agua que fluye al interior de la región hidrológica norte de la cuenca Balsas-Mezcala (que pertenece a la Cuenca Alto Atoyac, de la Región Hidrológico-Administrativa IV Balsas). El río Atoyac es la principal fuente de abastecimiento para las comunidades y municipios hortícolas al sur del estado de Tlaxcala, como es el caso de San Mateo Ayecac en el municipio de Tepetitla de Lardizábal y sus alrededores. Sin embargo, este río se encuentra contaminado, lo cual es un problema grave que afecta a la población que habita en sus alrededores, así como a las diferentes actividades que ella realiza. La solución a este grave problema no es sencilla ya que requiere de un esfuerzo integral de todos los agentes sociales involucrados y se deberá de dar de manera gradual a través de su mitigación. Es por esto que, en noviembre de 2019, a sugerencia de la Dirección Regional 4 Sur Oriente del CONACYT dirigida por el Dr. Javier Hirose López, por intermediación de la Dra. María Gabriela Garrett Ríos, se reunieron en la Ciudad de Tlaxcala los Centros Públicos de Investigación que conforman al CITLAX: CIQA, CIDETEQ, CIATEC, COMIMSA e INAOE con El Colegio de Tlaxcala (COLTLAX), para comenzar a colaborar académicamente para abordar este tema.

Derivado de dicho entendimiento, en 2021 se formó el *Grupo de Apoyo Técnico Transdisciplinario para la Restauración Integral de la Cuenca del Atoyac (GATTACA)*, derivado de los trabajos que desde junio de 2020 se venían desarrollando sobre la problemática, actividades de reconocimiento de la problemática socio-ambiental con autoridades e integrantes del ejido de San Mateo Ayecac municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, así como otras instituciones de investigación y educación superior. Lo anterior para cumplir el objetivo principal de la colaboración académica de coadyuvar a la solución de las

problemáticas regionales que afectan a la nación, en temas como la contaminación de agua y el uso de aguas residuales para su aprovechamiento en la producción de hortalizas, los cuales son temas Prioritarios Nacionales para la Agricultura, el Medio Ambiente, y la Salud Pública, según el planteamiento actual de los PRONACES de CONACYT. Por lo que en este libro intentamos abordar esta problemática en la región sur de Tlaxcala, particularmente en San Mateo Ayecac, desde un punto de vista holístico, debido a que entendemos que solo haciendo esfuerzos integrales entre los agentes sociales involucrados y con el apoyo de especialistas se podrá dar la mitigación gradual de la contaminación y sus efectos. El libro se divide en IV secciones para su mejor comprensión: Sección I. Marco conceptual, el cual comprende los Capítulos 1, y 2; Sección II. Calidad del agua, contaminantes y fertilidad del suelo, en los Capítulos 3, 4 y 5; Sección III. Dimensionamiento político, económico y tecnológico, con los Capítulos 6, 7 y 8; y, finalmente, Sección IV. Propuesta de abordaje, con el Capítulo 9.

Sección I. Marco conceptual

En el Capítulo 1 se aborda la contaminación del río Atoyac desde un punto de vista histórico y sus efectos sociales en la región de San Mateo Ayecac, que en el último año ha recibido el nombre de “nuevo Rey de la Mezclilla” por su rápido crecimiento en el número de industrias maquiladoras-textil, teñido y lavado de mezclilla. Aunado a lo anterior, Ayecac, pertenece al conjunto de comunidades asentadas en la frontera Tlaxcala-Puebla, cuya población está viendo afectada su salud y capacidad agro-productiva por la contaminación de origen industrial y público-urbano de las aguas residuales vertidas al Atoyac derivado de una política pública instituida desde el siglo XVI que persiguió la industrialización de la región a costa del medio ambiente. En tal virtud, en este Capítulo se documentan los efectos que dicha contaminación ha causado en los habitantes de la región en sus dos principales manifestaciones: las enfermedades físico-emocionales de la población, ya reportadas en otros estudios tales como cáncer o leucemia y la reducción del 50% de los cultivos regados hace

30 año, tanto en el ejido como en la pequeña propiedad, derivados principalmente de la implementación de las NOM 001-002. Esto no solo ha afectado negativamente en diversidad hortícola, sino también en la posibilidad de comercializar sus productos en los principales centros de distribución de alimentos como lo son las Centrales de Abastos de Puebla y Ciudad de México, por el hecho de regar sus cultivos con aguas residuales, cuya calidad ponen en duda los mismos agricultores y habitantes de la región al manifestar que las plantas de tratamiento ubicadas en San Martín Texmelucan, Puebla y Villa Alta, Tlaxcala, regularmente no funcionan de forma adecuada. Esto les obliga a utilizar en sus campos aguas residuales vertidas al río Atoyac sin tratamiento alguno, las cuales también han escaseado, derivado del azolve de los canales de riego y las decisiones de autoridades locales que han impedido el flujo del agua a través de los canales de riego. Esto en su conjunto ha generado conflictos sociales por el acceso al agua al interior de dicho territorio, convirtiendo a la contaminación del río Atoyac un asunto de política pública posiblemente analizable desde la perspectiva de los *problemas perversos* o *wicked problems*, en inglés. Dicha perspectiva se profundiza en el Capítulo 9.

Una vez que se ha abordado el tema de historia de la contaminación del río Atoyac, continuaremos con la caracterización físico-geográfica del paisaje en la microcuenca Atoyac-Xochiac. Por lo que, en el Capítulo 2 se presenta una breve descripción de los fundamentos teórico-conceptuales sobre las cuencas hidrográficas como unidades naturales de apoyo a la gestión pública de los recursos, así como de los postulados de la Geografía Física Compleja o Ciencia del Paisaje y sus posibilidades de aplicación en la planificación y ordenamiento territorial a escala regional-local. En un segundo momento, se muestra el proceso metodológico empleado para 1) la delimitación de la microcuenca Atoyac-Xochiac, perteneciente al Alto Atoyac y sus zonas funcionales y 2) la construcción y análisis de las unidades de paisaje y sus componentes físico-geográficos. La descripción de resultados se desarrolla en correspondencia con el planteamiento metodológico, para lo cual se hace uso de diferentes materiales cartográficos generados en la escala

1:50,000, pero adaptados al área de impresión del documento. Finalmente, se concluye que la estructura y composición físico geográfica de la microcuenca Atoyac-Xochiac, mostrada a partir de unidades de paisaje, permite tener una base cartográfica para la planificación territorial y sirve como marco de análisis para evaluaciones ambientales con miras a lograr la sustentabilidad del sistema.

Sección II. Calidad del agua, contaminantes y fertilidad del suelo

En los siguientes dos Capítulos se tratará sobre la calidad y contaminación del agua. Por un lado, en el Capítulo 3 se presenta la calidad del agua de la Cuenca Alto Atoyac. Esto es importante, ya que aproximadamente el 50% del suministro del agua potable en el planeta depende del agua contenida en los acuíferos. En las zonas áridas y semiáridas de América Latina, los acuíferos son la fuente de un tercio del total de agua utilizada y en México el agua subterránea es la principal fuente de abasto para diversos usos. El conocimiento de la disponibilidad del agua, no solo en términos de su cantidad, si no cada vez más de su calidad, en el tiempo y el espacio, es muy importante. De acuerdo con lo anterior se consideró relevante determinar y analizar la calidad de agua subterránea de la Cuenca Alto Atoyac para uso doméstico y agrícola a partir de la aplicación de diversos índices. Para ello se obtuvo la información generada y recopilada por la CONAGUA, en la Red Nacional de medición de la Calidad del Agua y se seleccionó de manera específica la generada para la Cuenca Alto Atoyac y se determinaron los *Índices de Calidad del Agua*. Los resultados dan cuenta de un acuífero libre con condiciones de contaminación bacteriológica, pero también con presencia de niveles superiores a los establecidos en la normatividad oficial mexicana de fierro y flúor, este último puede tener implicaciones graves en la salud humana de quienes consumen esa agua. Con respecto a la calidad del agua para riego agrícola, los resultados muestran que la Cuenca presenta adecuados niveles de sodicidad, pero no así en las condiciones de salinidad. Finalmente, se recomienda establecer y/o mejorar las condiciones de monitoreo de la calidad del agua, incrementar los puntos de observación,

sobre todo en las zonas en las que se observa la presencia de flúor, así como, en los casos en los que se da el consumo directo del agua de la Cuenca Alto Atoyac, someterla a procesos de tratamiento para la remoción de la contaminación bacteriológica, pero también para la remoción del fierro y, sobre todo, de los altos niveles de flúor.

Por otro lado, en el Capítulo 4 se analiza la calidad del agua y los contaminantes de la Cuenca Alto Atoyac. Este capítulo es referente a la calidad del agua y su relación con la información cualitativa y cuantitativa de diferentes contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbiológicos (colorantes, agroquímicos, compuestos farmacéuticos, derivados de la industria petroquímica y automotriz, compuestos orgánicos, entre otros). Por ende, se realizó una agrupación de los principales contaminantes encontrados a partir de su naturaleza y características químicas, con el propósito de establecer un primer acercamiento y ofrecer, desde una perspectiva holística, propuestas integrales de saneamiento de la cuenca a través de tecnologías actuales que podrían atender la variedad de contaminantes detectados a la fecha en aguas superficiales de la Cuenca Alto Atoyac, y en sus principales afluentes de origen antropogénico. Esto a fin de establecer, en un futuro, las bases para la creación de un modelo científico-comunitario integral y transdisciplinario para el mejoramiento de la calidad del agua de dicha cuenca en las comunidades de estudio.

A continuación, en el Capítulo 5, se presenta el efecto del agua en la fertilidad del suelo en la región. En este caso, se realizó un diagnóstico de la fertilidad del suelo y aporte nutrimental de las aguas del río Atoyac en el ejido San Mateo Ayecac, debido a que como se ya se ha mencionado, el uso de aguas residuales para riego se ha convertido en una alternativa para la producción de cultivos siempre y cuando no existan afectaciones a la salud pública, al suelo y al ambiente. Esto supone poner especial atención en la calidad del agua desde un punto de vista sanitario, agronómico y ambiental. El objetivo del presente estudio fue evaluar el aporte nutrimental de las aguas residuales del río Atoyac y su efecto sobre la fertilidad del suelo para la generación de recomendaciones de fertilización en cultivos de interés local.

Los resultados encontrados mostraron en el agua residual, que el contenido de iones útiles para la agricultura es bajo, de igual manera los parámetros para evaluar la conveniencia del uso de agua para la agricultura como son salinidad efectiva (SE), salinidad potencial (SP), relación de adsorción de sodio (RAS), carbonato de sodio residual (CSR) y conductividad eléctrica (CE) no mostraron restricción alguna. Sin embargo, los resultados del análisis de la fertilidad del suelo mostraron un pH alcalino (8.43) lo que puede limitar la disponibilidad de micronutrientes (Fe, Zn, Cu y Mn) para los cultivos. De igual manera, el contenido de sodio implica que se deba aplicar CaSO_4 (1.62 t. ha^{-1}) para evitar problemas asociados a la presencia de ese elemento en el suelo. Con relación a los metales pesados evaluados solo se identificó que plomo y silicio rebasan los límites críticos. Las dosis de fertilización generadas con base en el análisis de agua y suelo para los cultivos de maíz (10 t. ha^{-1}) y brócoli (25 t. ha^{-1}) fueron de N-P₂O₅-K₂O-Ca-Mg-S(SO₄), 00-75-00-00-00-00 y 00-105-56-00-00-15, para los mismos nutrientes, respectivamente.

Sección III. Dimensionamiento político, económico y tecnológico

En el Capítulo 6 se dimensiona políticamente la contaminación del río Atoyac en el municipio de Tepetitla de Lardizábal y tiene como objetivo caracterizar las prácticas sociales de los agentes, que en el contexto de una estructura tanto formal como informal, y disponiendo de recursos de autoridad y económicos, han coadyuvado de manera voluntaria o involuntaria a la producción y reproducción de la problemática de la contaminación del agua del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal, apoyándose en conceptos de la teoría de la estructuración de Antony Giddens como estructura y acción, entre otros. Para lo anterior se entrevistaron a personas que por ocupar o haber ocupado un cargo en sector gubernamental, social o económico y haber contado con la capacidad de hacer una diferencia al respecto, se consideran agentes sociales. De esta manera, se obtuvieron y se muestran la percepción y postura de ellos sobre los orígenes, la gravedad y las principales fuentes de contaminación del río,

así como los elementos normativos y códigos de significación que prevalecieron en el ejercicio de sus funciones y su interacción, y que tuvieron una marcada influencia en el grado de coordinación interinstitucional logrado, la disponibilidad de recursos económicos y la vinculación y concertación con los sectores económico y social en la búsqueda de una solución a este problema, agregando así desde la dimensión política, nuevos factores a ser considerados en un análisis más integral sobre el tema de estudio.

Debido a que la acción política está íntimamente relacionada a la acción económica y a la comunidad, en el Capítulo 7 se aborda este tema. En este caso, se realizó la propuesta de un modelo integral de restauración sanitaria y ecológica de la comunidad de San Mateo Ayecac, haciendo un diagnóstico de la situación actual, en relación con su quehacer que deteriora en alguna medida al río Atoyac y, a su vez, los efectos indeseados generados para la comunidad. Se integraron diferentes elementos teóricos conceptuales, en donde se incluyó una revisión del marco jurídico, que determinó su evolución para fortalecer la articulación entre la producción y la generación de riqueza comunitaria y la protección al ambiente como contraparte. Dichos elementos dieron certeza y transparencia a la construcción del modelo integral de restauración sanitaria y ecológica propuesto. El “Modelo de restauración sanitaria y ecológica”, derivado para las zonas afectadas, está fundamentado en la participación y gestión de la comunidad, al establecer en la reflexión sus propias prioridades. El desarrollo centrado en los individuos, se transforma en el motor para la gestión de los nuevos procesos, que también integran a la empresa, la académica y las diferentes instancias de gobierno, a través de la generación de proyectos de carácter sanitario y ecológico, que focalicen los esfuerzos e inversiones privada y pública. Finalmente se despliega el modelo operativo de restauración sanitaria y ecológica, situado dentro de un ciclo de mejora continua, que pudiera adaptarse según las particularidades de la zona intervenida. Para ello, la identificación clara y sencilla de la problemática particular de cada comunidad ribereña, la no dispersión de metas, recursos para los proyectos de restauración priorizados y consensuados entre los diferentes

actores, con el apoyo un comité de transparencia y vigilancia ciudadana, permitirá alcanzar metas graduales que contribuirán al saneamiento del río, sin dejar de lado los aspectos ambientales, sustentables y de desarrollo económico.

En el Capítulo 8 se hace un aporte de los posibles medios técnicos para remediar el agua del río Atoyac. Uno de los sistemas más sofocados y que resulta de vital importancia para mantener el equilibrio ecológico-ambiental es lo concerniente al sistema hídrico global, el cual, ha sido devastado hasta alcanzar índices de contaminación preocupantes. Como respuesta a esta situación, recientemente, se han propuesto alternativas tecnológicas bastante prometedoras mediante la implementación de sistemas inorgánicos a base de procesos electroquímicos, adsorción, oxidación y foto-oxidación; en donde la nanotecnología propone un enfoque desde el diseño, preparación y caracterización de nanomateriales combinados con sistemas híbridos en procesos de adsorción físico/química y óxido-reducción química, principalmente. Sin embargo, existe el riesgo latente del uso inapropiado de nanomateriales. En consecuencia, uno de los grandes retos a vencer para poder hacer uso del potencial de los nanomateriales, en procesos que coadyuven contribuir a la regeneración del agua, es crear medios, sistemas y/o arreglos que funcionen como soporte de las nanopartículas; es decir, obtener matrices en las cuales se logren retener parcial o permanentemente a las nanoestructuras. En este sentido, una de las propuestas más convincentes es el uso de nanomateriales combinados con sistemas híbridos en procesos sinérgicos de adsorción físico-química y óxido-reducción química; esto es, la aplicación de nanopartículas cerámicas, metálicas, magnéticas, carbonosas, etcétera, con materiales empleados como soportes hechos a base de compuestos carbonosos (*biochar*) y/o fibras poliméricas, y/o arcillas modificadas, entre otros materiales de soporte, acoplados a sistemas de remoción. Por ende, se describen solo algunas de las tecnologías más prometedoras a nivel global para la regeneración de agua, mediante compuestos a base de materiales de soporte con nanopartículas de diversas composiciones químicas. Las actividades que propongan este tipo de soluciones tecnológicas resultarán alentadoras; que, si

bien son complejas, esto no debería minimizar su aplicación potencial.

Sección IV. Propuesta de abordaje

Finalmente, en el Capítulo 9 debido a la complejidad para atender la problemática del río Atoyac se hace una propuesta de cómo abordarla. Usualmente, el procedimiento ordenado para realizar una investigación que considera un problema a resolver con el método científico, tiene etapas claramente identificadas, ya sea en revistas científicas o tesis de licenciatura, maestría y doctorado. Las investigaciones científicas realizadas respecto al problema de la contaminación del río Atoyac en Tlaxcala-Puebla siguen un patrón metodológico similar a lo mencionado para artículos o tesis de grado. Por otro lado, hace alrededor de 50 años, Rittel y Webber (1973), en su artículo ya clásico, y cuya relevancia sigue vigente “Dilemma’s in a General Theory of Planning”, introdujeron el concepto de *wicked problems* como problemas que podrían llamarse “perversos”, en el sentido de que estaban mal definidos y nunca podrían resolverse, dado que la ciencia se ha desarrollado, de manera general, para tratar problemas “domesticados” o predecibles. Más aún, se afirma que *wicked problems* es un concepto, un proceso y un marco que puede utilizarse para identificar las razones de las tensiones, contradicciones y las paradojas en la teoría, la investigación y la práctica. El objetivo de este ensayo fue documentar que el problema de contaminación del río Atoyac en su frontera Tlaxcala-Puebla es un problema perverso (*wicked problem*). Para ello, por un lado, se eligieron 29 publicaciones que se relacionan con la contaminación del río Atoyac, para corroborar el uso del método científico en su metodología. Por otro lado, se consideraron los resultados obtenidos por una investigación reciente del árbol de problemas desarrollado por un grupo de científicos y académicos sin la participación de otros actores involucrados (Comunidad). Se revisaron fuentes secundarias que definen y describen a los problemas perversos y se hizo la relación con lo encontrado por los autores mencionados. Se encontraron dos características del problema de contaminación del río Atoyac que coinciden con

las de los problemas perversos reportados en la literatura (no se considera como requisito que un wicked problem tenga las 10 características mencionadas por Rittel y Webber). Se concluyó que en tanto no se aborde holísticamente esa problemática y no se supere el paradigma de la investigación científica lineal de la ciencia ¡normal! (para la resolución de problemas, se recopilan datos, se analizan, se formulan soluciones y se implementan) y se le reconozca como un *problema perverso*, ella tenderá a agravarse cada vez más.

Palabras clave: río Atoyac, contaminación, romper paradigma, epistemología lineal, sustentabilidad.

Atoyac somos Todos
Todos somos Atoyac

Dr. Carlos Alberto Ávila Orta
Responsable Técnico del CITLAX
Jefe del Departamento de Materiales Avanzados
Centro de Investigación en Química Aplicada

SECCIÓN I. MARCO CONCEPTUAL



CAPÍTULO 1. LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO ATOYAC Y SUS EFECTOS SOCIO- AMBIENTALES EN SAN MATEO AYECAC, TLAXCALA

María de Lourdes Hernández-Rodríguez¹

Introducción

El Atoyac, corriente superficial de agua que fluye al interior de la región hidrológica norte de la cuenca Balsas-Mezcala, es la principal fuente de abastecimiento para los municipios hortícolas al sur del estado de Tlaxcala, México; ente los que destaca Tepetitla de Lardizábal, donde además se asientan las industrias maquiladora-textil y de teñido de mezclilla desde la década de 1980, cuyas descargas de agua residual pintan al río de azul, verde, amarillo, rojo y negro (Méndez et al., 2000) lo que, sumado a las descargas público-urbanas, han ocasionado que dicho río sea considerado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), activistas sociales, población local y académicos como el principal causante de problemas de salud humana, reconociéndolo como el segundo río más contaminado de México (Trejo, 2020).

Se dice que el agua está contaminada cuando contiene materiales extraños, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales y/o domésticos que alteran sus características naturales (Jiménez, 2007; como se citó en Barrios et al., 2021 p. 33). En el caso de las aguas del Atoyac, este hecho ha sido documentado por Villalobos et al. (2011), Suárez et al.

¹ Profesora-Investigadora de El Colegio de Tlaxcala, A.C., correo-e: malourdes_hernandez@coltlax.edu.mx

(2011), Soto et al. (2011), y Rodríguez y Morales (2014), quienes señalan que cuando estas aguas atraviesan el estado de Tlaxcala, llevan en el cauce sustancias genotóxicas para la salud humana y ambiental, ocasionadas por las descargas de origen industrial y doméstico. Asimismo, la problemática ambiental que se genera por dicha contaminación se evidencia en dos grupos: el primero, y objeto de interés de este capítulo y del libro en su conjunto, cuando el agua del río se utiliza con fines agrícolas para la producción de alfalfa, hortalizas, leguminosas y maíz, ya sea por la afectación a dichos cultivos o directamente a la salud de los agricultores quienes manifiestan enfermedades dermatológicas; el otro grupo es la población local, quienes refieren enfermedades tales como: cáncer, problemas renales, deficiencia en el desarrollo del tubo neural, afectación de la médula ósea e infecciones gastrointestinales (Pagán, 2016). Ambos incidentes condujeron a que, en 2017, la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) emitiera la Recomendación 10/2017 en materia de violación a los derechos humanos y a un medio ambiente sano, al saneamiento del agua y acceso a la información con relación a la contaminación del río Atoyac.

De acuerdo con Rosas (como se citó en Castillo, 2018a, párr. 5), desde el año 2005 las autoridades saben que aún con el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1996) y con el establecimiento de la Declaratoria de Clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac en 2011, los límites máximos permisibles de descargas fijados no son suficientes para estimar el grado de contaminación del Atoyac; ejemplo de ello se suscitó en 2015, cuando varias empresas ubicadas en la ribera del río pertenecientes a los municipios de San Martín Texmelucan, Puebla y Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, fueron clausuradas por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPa), la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y la CONAGUA, al demostrarse que los residuos que vertían al Atoyac reportaron

presencia de meticilina, tolueno y cloroformo... agentes que dañan el ADN ... y posibles causantes de la tasa de mortalidad regional por leucemia [al tiempo se señala que], 75% de los municipios tlaxcaltecos circunvecinos

al río, descargan en él sus aguas residuales sin ningún permiso. (Zamudio, 2015)

Con base en lo anterior, para marzo del 2021, Arellano estimaba en la región “más de 2 millones de personas afectadas por la contaminación del Atoyac...puesto que el Índice de Contaminación del Agua [ICA] oscila entre uno y 50 puntos” (como se citó en Zambrano, 2021, parr. 3), rango basado en la escala de clasificación del ICA (CONAGUA, s.f., p. 14), utilizado para señalar a ambas puntuaciones como indicadores de los dos criterios con más baja calidad, para valorar la que puede tener un agua, lo que significa que está entre altamente contaminada y contaminada, es de dudoso o inaceptable uso para fines tanto de abastecimiento público como recreativo, e incluso como hábitat de especies acuícolas sensibles. De igual forma, se encuentra entre los parámetros de “no aceptable y/o con necesidad de tratamiento mayor” para los usos agrícola e industrial, originando con ello conflictos hídricos, esto es: “acciones que denotan tensiones entre dos o más actores relacionados con el uso, aprovechamiento y/o gestión del agua”, situación similar a la sucedida en 22% de los casos de conflictos por agua en México (Sainz y Becerra 2003; Atayde y Vega, 2006; como se citaron en Hernández, 2011, pp. 233 y 236).

En el caso del municipio de Tepetitla de Lardizábal, unidad administrativa a la que pertenece San Mateo Ayecac, la contaminación del agua también se manifiesta como la principal causa de los problemas socioambientales que se viven en la rivera de las comunidades rurales del Atoyac, en donde aguas residuales de origen doméstico e industrial se incorporan a su cauce, ocasionando molestias entre los diversos actores sociales, ya que dichas aguas se vierten a arroyos y barrancas sin tratamiento previo, mezclándose con el agua limpia de pequeños manantiales que intoxican no solo el cauce del río, sino también el suelo y subsuelo, afectando directamente a la salud de la población y a la producción de los cultivos agrícolas (SEMARNAT, 2008a y 2008b).

Particularmente en la localidad de San Mateo Ayecac y su zona agrícola, la población observa todos los días la contaminación del río; sin embargo, en general no tienen certeza

del origen y consecuencias que para ellos tiene dicho fenómeno. Con base en lo anterior, el objetivo de este capítulo es documentar la historia de la contaminación del río Atoyac en la frontera del Tlaxcala con Puebla, particularmente en la comunidad de San Mateo Ayecac, a fin de precisar y dar a conocer a la población y a los tomadores de decisiones, los efectos que este fenómeno ha ocasionado en el entorno socioambiental, y con ello buscar un planteamiento transdisciplinario que les oriente a la búsqueda de una solución integral de dicha problemática.

Fundamentación teórico-conceptual

De acuerdo con Ruiz (2014; como se citó en Barrios et al., 2021), conocer la percepción sobre los problemas ambientales asociados al uso y aprovechamiento de recursos naturales que afectan a los habitantes de comunidades rurales, como es el caso de San Mateo Ayecac, asume como propósito “tener datos acerca de las distintas perspectivas, visiones y respuestas de los diversos grupos sociales, todas ellas relevantes para aminorar su vulnerabilidad social” (p. 10). Por ello, y debido a lo entramado de su comportamiento de su problemática y para su mejor comprensión, pueden ser estudiados desde tres perspectivas: a) complejidad ontológica, por ser sistemas con componentes heterogéneos y con una diversidad de interacciones (naturales/físicos, tecnológicos y sociales); b) complejidad social, al tratarse de sistemas gestionados y gobernados por diferentes grupos de gente, con diferentes propósitos, intereses, beneficios y significados, muchas veces conflictivos entre sí; y c) complejidad analítica, al ser sistemas complejos, difíciles de entender, por lo que su conocimiento desde las disciplinas científicas es simplemente parcial y sesgada (Mollinga, 2010; como se citó en Rocha, 2014, p. 9).

Bajo la última de las tres perspectivas de abordaje, y conscientes de que la complejidad de los problemas socioambientales, además del conocimiento científico deben ser estudiados enfatizando el comportamiento de los sistemas sociales sobre los técnicos, surge el concepto de *wicked problem* (WP), problemas perversos o problemas retorcidos, el cual fue

ideado por Rittel y Webber en 1973 para referirse a los problemas sin fácil solución. Esto es, aquellos que son multicausales, ambiguos, generadores de incertidumbre, dinámicos y no estructurados, de gran escala y solucionables a largo plazo, por lo que requieren de soluciones basadas en pequeños avances, que reconozcan progresos graduales y el posible cambio que generan en la sociedad y en el ambiente (Morner y Misgeld, 2014; Peters, 2017; Termeer y Dewulf, 2019; como se citaron en Olaya et al., 2021, pp. 180-183), que tienden un puente a la realización de estudios con un enfoque transdisciplinario.

De acuerdo con Rittel y Webber (1973; como se citó en Olaya et al., 2021, p. 180), los problemas retorcidos tienen las siguientes características:

- a) Son difíciles de definir. No hay una formulación definitiva.
- b) No tienen una regla de detención.
- c) Las soluciones a estos problemas no son verdaderas o falsas.
- d) No existe una prueba inmediata o definitiva para solucionarlos.
- e) Todos los intentos de solución tienen efectos que pueden no ser reversibles o inolvidables.
- f) No tienen una solución clara, y quizás ni siquiera un conjunto de posibles soluciones.
- g) Cada problema es esencialmente único.
- h) Todo problema puede ser un síntoma de otro problema.
- i) Hay múltiples explicaciones para el problema.
- j) El formulador de políticas no tiene derecho a equivocarse.

Es por ello que la atención a *wicked problems* involucra a múltiples actores, ya que al ser problemas políticamente complejos y difíciles de manejar, Peters (2017) advierte que estos deben ser abordados desde la perspectiva de los problemas retorcidos, esto es: a partir del conocimiento de los actores involucrados, pues de otra forma se corre el riesgo de que la complejidad del problema sea inadecuadamente interpretada y deficientemente estructurada, al no darle el adecuado peso a los valores y recursos locales. Un problema retorcido, deficientemente estructurado, se

debe de acuerdo con Simon (1973; como se citó en Peters, 2017) a que no está claramente definido, delimitado y carece de una base de conocimiento confiable (sustentada en el conocimiento de los actores locales) sobre la realidad que se quiere atender.

En ese sentido, Olaya et al. (2021) proponen que la primera consideración para abordar problemas perversos es describir el contexto social, sus valores e historia y con ello, en un último propósito, identificar el grado de problematicidad, conflicto y/o tipología del problema, mismo que se seguirá para dar cumplimiento al objetivo planteado en este trabajo.

Metodología

La zona de estudio

Partiendo de la recomendación postulada por Termeer y Dewulf (2019; como se citó en Olaya et al., 2021, pp. 180-182), para atender un problema perverso se requieren soluciones basadas en pequeños avances. Se tomó como territorio de análisis a la comunidad de San Mateo Ayecac, Tlaxcala (ver Figura 1), por encontrarse en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, es una comunidad asentada en la ribera del Atoyac, con evidencia documentada de descargas municipales e industriales al Atoyac, así como práctica de agricultura de riego, presencia de talleres de textiles y lavandería de mezclilla (Pagán, 2016; Rosas, 2017a, 2017b, 2018; Baños, 2019; Baños, 2021; Zambrano, 2021; CONAGUA, s.f.).

Para la realización de este trabajo, en una primera etapa, se recopiló información secundaria de los últimos 30 años sobre la evolución de la contaminación en la zona de estudio y, en una segunda etapa, se registró la percepción de autoridades locales y agricultores sobre dicha problemática, con base en los principios del método etnográfico, bajo las técnicas de observación participante y guía estructurada de entrevistas, la cual, de acuerdo con Geertz (2003; como se citó en López, 2020, pp. 67-71) y Perea (s.f., pp. 1-5), persigue captar, registrar y describir las relaciones sociales del individuo o grupos de interés, mediante la selección de textos e informantes clave, la transcripción de

textos y el trazo de interacciones para llegar a la descripción e interpretación del discurso social.

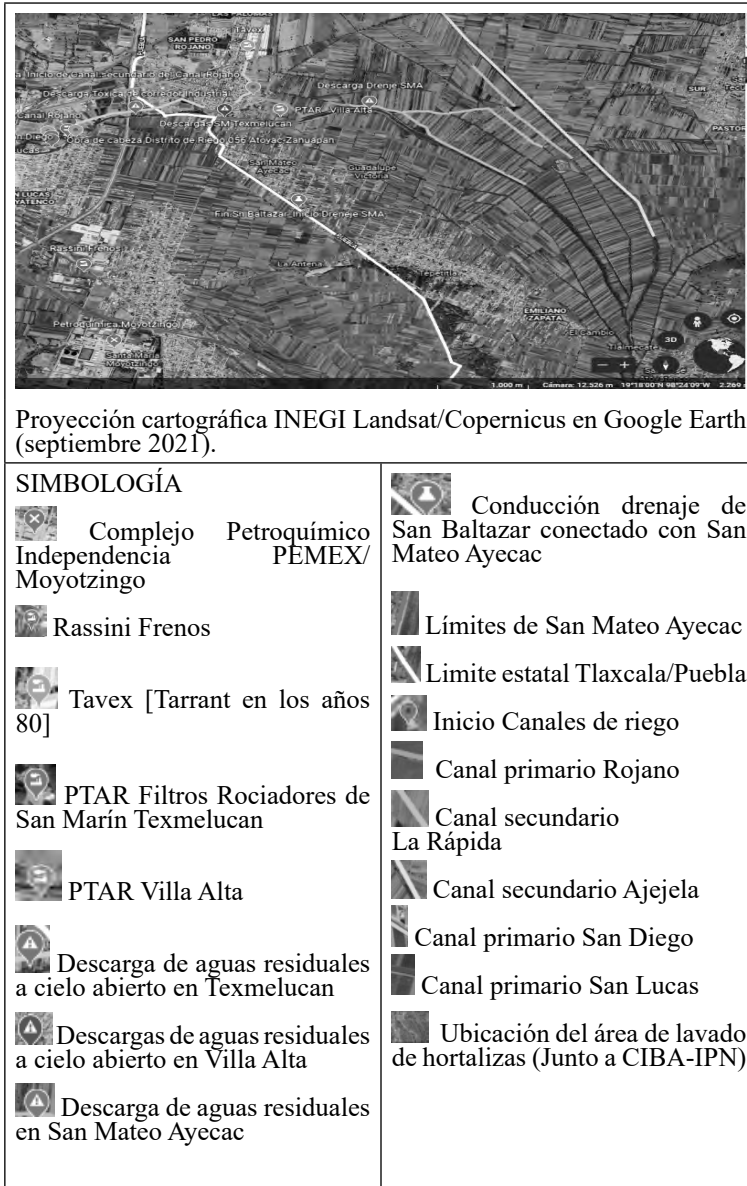
Figura 1. Ubicación de San Mateo Ayecac, Tlaxcala



Fuente: elaboración propia, con base en Coltlax-CESET (2008).

Asimismo, mediante la aplicación de Google Maps, durante el tiempo que duró el trabajo de campo (marzo a julio del 2021) se referenciaron geográficamente las principales fuentes de contaminación, zonas de descarga, la obra de cabeza del Distrito de Riego 056 Atoyac Zahuapan y diversos puntos de origen de los canales de riego San Diego San Lucas Rojano, y sus secundarios La Rápida y Ajejela, que conducen el agua del Atoyac con la que se irriga el ejido de San Mateo Ayecac y la pequeña propiedad agrícola de dicha comunidad por pobladores de Ayecac. Dichos puntos de referencia se georeferenciaron bajo la guía y ubicación de autoridades ejidales y actores clave de la comunidad durante recorridos de campo hechos entre abril y septiembre 2021, geoposicionados por la aplicación electrónica de Google Map (ver Figura 2).

Figura 2. San Mateo Ayecac, Tlaxcala y principales fuentes de contaminación del Atoyac percibidas por sus habitantes



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo, abril-septiembre 2021.

Análisis y discusión de resultados

El contexto social, los valores e historia de la contaminación del río Atoyac en San Mateo Ayecac, Tlaxcala

San Mateo Ayecac es la tercera comunidad en importancia del municipio Tepetitla de Lardizábal. Está ubicada en la frontera de los estados de Puebla y Tlaxcala, entre las coordenadas geográficas 98°23'38.707"W y 19°16'45.975N a 2 231 msnm; para el año de referencia contaba con 4,401 habitantes y una extensión territorial de 76 hectáreas (INEGI, 2020; Pueblosamerica, 2021).

Con base en documentos históricos de Tlaxcala, se sabe que el área en donde se encuentra San Mateo Ayecac pertenece al denominado Bloque Nativitas, cuyos primeros grupos humanos se registran entre los años 600 al 900 con la cultura Olmeca-Xicalanca; y cuyas planicies se consideraron como una zona “no habitable” (Aguilera y Ríos, 1991, p. 412), pues se trataba de suelos anegables y ribereños al Atoyac, en ese entonces destinados básicamente al cultivo del sistema milpa maíz-frijol (ayocote)-calabaza. García y Merino (1991) señalan que los reducidos grupos tribales ahí asentados, lo hicieron “sin rebasar en absoluto [el límite natural fijado por] el río Atoyac” (p. 408), pues del otro lado habitaba el históricamente adversario pueblo Huejotzinga. En este contexto es necesario señalar etimológicamente el significado de la palabra Ayecac, la cual está compuesta por *Ayec* (frijol ayocote) y *Milli* (sembradío), esto es, “sembradío de ayocotes”, desatacando con ello la importancia de Ayecac como un espacio primordialmente dedicado a la agricultura, con escasos asentamientos humanos y cuya función fue ser territorio limítrofe y cerco cultural entre Olmecas-Xicalancas y Huejotzingas.

Con la conquista española del siglo XVI, el territorio se redistribuyó y se fundaron las haciendas; una de ellas, la de San Juan Molino, propiedad de Diego Lennox Kennedy, situada en lo que se conoció como “el fértil valle de Nativitas”, y que en el siglo XIX se destacó su producción de maíz, cebada, trigo, haba, alverjón, frijol, ayocote y papa, cultivados bajo los regímenes de humedad residual y riego implementados en la ribera del Atoyac

desde la época precolombina (García y Pérez 1991a, p. 21; García y Pérez 1991b, p. 134); así como por la producción de pulque, propia de la finca de San Mateo Ayecac, que fue adquirida y refundada por 231 vecinos de Tepetitla con fines de explotación agroindustrial del pulque (INAFRED, s.f., parr. 10 y 16).

De acuerdo con González (2009), la situación productiva de las haciendas establecidas en el valle de Nativitas, persistió hasta entrada la década de 1940 con el inicio del Distrito de Riego 056 Atoyac Zahuapan y la política hídrica del Estado mexicano, la cual estaba interesada derivar el agua del Atoyac y su zona de humedales-drenes del sur de Tlaxcala hacia la zona de fábricas textiles asentadas en la ribera del cauce del río, entre los estados de Puebla y Tlaxcala, la presa Valsequillo, y el establecimiento de todo tipo de industrias. La región, la frontera de ambos estados, habría de convertirse en un Corredor Industrial, todo ello basado en la “presencia permanente de agua, mano de obra y [una adecuada red de caminos] y comunicaciones” (González, 2009, p. 174), así como una férrea política de condonación de impuestos a favor de la industria de la lana y el algodón, entre otras (Nava, 2011, p. 113), aprovechando, limitando y en ocasiones privando del agua propia de un ecosistema con espacios naturalmente anegados, y cuya agricultura y agricultores necesitaban del drenaje de suelos salinos, agua para la limpieza de canales, el cultivo de plantas acuáticas y el aprovechamiento de manantiales para el propio consumo doméstico.

Fue así que, bajo la justificación del reparto agrario, se desecaron tierras inundables, se convenció a la población de realizar trabajos comunitarios y los propietarios de las haciendas agroganaderas se convirtieron en los dueños de las nuevas industrias de la región

Esta temprana industrialización [estimulada y fortalecida por los gobernantes y nuevos empresarios de la industria textil desde mediados del siglo XVI], fue en gran medida responsable del incremento de descargas de desechos sólidos y residuos tóxicos al suroeste del río, (González, 2008, p. 11; González, 2009, pp. 175-184; González, 2016, p. 130; Martínez, 2021)

pues desde ese entonces los obrajes utilizaron las aguas para el lavado de telas, hecho que confirma Nava (2011) al señalar que “uno de los principales factores para la localización de las industrias en Tlaxcala, fueron los ríos Atoyac y Zahuapan” (pp. 103, 106, 113-114).

Derivado de la contaminación del Atoyac, así como de la reconversión productiva agrícola-industrial, muchos campesinos se emplearon en diversas industrias de la frontera Tlaxcala-Puebla, pero también otros migraron a espacios mejor remunerados; tal es el caso que refiere Vallejo (2016; como se citó en Gutiérrez, en prensa), al señalar que

La introducción de la maquila de confección en el municipio de Tepetitla comenzó en los años ochenta [del siglo XX, como] un proceso ligado fuertemente a la migración hacia la Ciudad de México... [y] parte de las estrategias de sobrevivencia, de los habitantes de Tepetitla [quienes] se insertaron en el mercado de trabajo de la ciudad, en donde, entre otras actividades, se podían emplear en la confección” [labor que aprendieron previamente al emplearse en la industria maquiladora de su municipio].

En este sentido, Nava (2011) indica que entre los años 1970 y 2009, en el municipio de Tepetitla, existían cuatro establecimientos industriales registrados en el directorio industrial de la Secretaría de Desarrollo Económico (SEDECO), cifra que para el 2021 llegó a 1,701 (Directorio Empresarial de México, 2021), de las cuales, 290 son manufactureras, giro industrial que

Comprende industrias dedicadas principalmente a la transformación mecánica, física o química de materiales o sustancias con el fin de obtener productos nuevos; al ensamble en serie de partes y componentes fabricados; a la reconstrucción en serie de maquinaria y equipo industrial, comercial, de oficina y otros, y al acabado de productos manufacturados mediante el teñido, tratamiento calorífico, enchapado y procesos similares, (Ranqueado de Empresas en México, 2021)

entre ellas, 127 asociadas directamente a la industria de la mezclilla, destacándose Tavex, antes Textilera Tarrant Apparel Group de Ixtacuixtla, donde se realizan diferentes procesos de

la industria de la mezclilla que incluye diseño, trazo, lavado, confeccionado, etiquetado y venta de dicha tela.

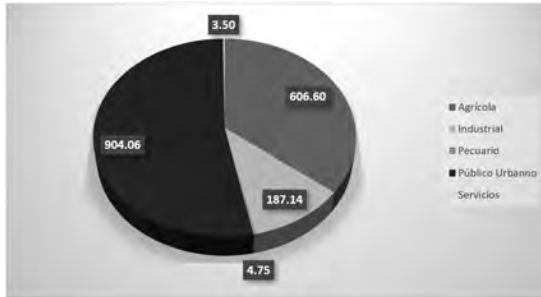
En este contexto, Baños (2021) señala que, para inicios de la segunda década del siglo XXI, en Tepetitla de Lardizábal se estimaba la existencia de 200 talleres domésticos con máquinas industriales y modernos sistemas de lavado que dan el acabado final a la tela, de los cuales “30 [están] ubicados en San Mateo Ayecac”, considerado hoy como “el nuevo rey de la mezclilla en Tlaxcala”. De hecho, para 2019 Market Data México estimaba que San Mateo Ayecac contaba con 200 establecimientos comerciales, en su mayoría minoristas (sin especificar el giro comercial), con una plantilla laboral cercana a 1000 empleados y un *output* económico de MXN \$320 millones anuales, producto de la reconversión productiva de la que la población local, originariamente dedicada a la agricultura, ha pasado a ser mano de obra y/o propietaria de talleres asociados con la industria de la mezclilla y sus derivados, esto es: maquiladoras, lavanderías, teñidoras y comercializadoras.

Cabe señalar que, durante la realización del trabajo de campo en el que se recabó información para este documento, se pudieron identificar al menos 15 empresas dedicadas al lavado de mezclilla de las 30 de menciona Baños (2021) instaladas en su mayoría al interior de los espacios domésticos, especulándose que cada una de esas empresas cuenta con una noria para la extracción del agua subterránea utilizada para el lavado y demás procesos industriales necesarios en la industria de la mezclilla. En éste contexto es conveniente señalar, que de acuerdo con el Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA, 2019) en el municipio de Tepetitla de Lardizábal existen 15 aprovechamientos subterráneos (Figura 3) con 1,706.0 Mm³ de agua concesionada para los siguiente usos: tres pozos con fines agrícolas, siete público-urbano (uno de ellos ubicado en San Mateo Ayacac, con 151.8 Mm³), uno destinado a uso pecuario, dos otorgados al sector servicios y dos más para uso industrial, éstos últimos referenciados en la comunidad de Villa Alta; lo que significa, que al menos para ese año en Ayecac no se contaba con agua subterránea concesionada para usos industriales.

Adicionalmente, se infiere que los desechos de las lavanderías y demás empresas asociadas a la mezclilla, se vierten a la red de drenaje público de la localidad sin tratamiento alguno y que éstas a su vez lo hacen directamente al Atoyac, como se refiere en la Figura 2, en un área ubicada en la zona de riego entre el ejido y la pequeña propiedad de San Mateo Ayecac, hecho que además de contaminar las aguas del cauce del río, también afecta directamente a la producción de los cultivos agrícolas de la región y a las aguas que brotan de los pequeños manantiales, haciéndolas no consumible por personas, animales de tiro y fauna local.

Cabe señalar, que, tanto el ejido y la pequeña propiedad de San Mateo Ayecac, tienen su origen en las dotaciones ejidales y las adquisiciones de tierra realizadas lugar tras el reparto agrario en 1910, como consecuencia de la afectación a la hacienda San Juan Molino (Oropeza 1993, p. 61); en el primer caso la superficie ejidal se legitimó el 26 de noviembre de 1929 y que de acuerdo con el Registro Agrario Nacional desde el 3 de septiembre de 1995 consta de 165.79 hectáreas en beneficio de 137 ejidatarios y un avocindado (RAN-PHINA, 2021), de los cuales están vigentes 129 según cuenta la Presidenta del Comisariado Ejidal (Castañeda, O., entrevista personal, abril 4, 2021) mientras que la pequeña propiedad se ubica en la fracción San Pedro y tiene una superficie aproximada de 45 hectáreas (Castañeda, O., entrevista personal, junio 3, 2021), tierras todas afectadas por la calidad del agua que corre en los canales de riego, y que se contamina (según dice la gente) principalmente por la Petroquímica de Moyotzingo ya referida en la Figura 2.

Figura 3. Volumen (Mm³) del agua subterránea concesionada en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, según su uso



Fuente: elaboración propia, con base en CONAGUA (2019).

Los efectos de la contaminación del Atoyac en San Mateo Ayecac y en toda la ribera del Atoyac que vincula territorialmente la frontera entre los estados de Puebla y Tlaxcala, comenzaron a manifestarse de forma preocupante, en cuatro momentos: a) el primero coincide con el establecimiento del Complejo Petroquímico Independencia de PEMEX 1969; b) el segundo durante la década de 1980 y un conjunto de industrias automotriz, farmacéutica, metalúrgica, metal mecánica, del papel, refresquera y textil asentadas en los municipios de Ixtacuixtla Tlaxcala y Huejotzingo Puebla, tales como Polifil, Condumex, Oxiquímica, Big Cola entre otras, se conectaron al drenaje municipal y vertieron en él metales tóxicos, cloroformo, cloruro de metileno tolueno, diclorobenceno y disulfuro de carbono, entre otros; c) un tercer momento fue la fuga de diesel en diciembre de 2010 que contaminó el río Atoyac y dejó inservible el agua de los canales de riego, y d) el cuarto fue a partir de la proliferación de las lavanderías de mezclilla, lo que junto con la proliferación de deposición de basura de origen doméstico, por insumos agrícolas e industriales, el cauce del Atoyac se ha convertido en un drenaje y tiradero de desechos a cielo abierto (Garibay, s.f.; Coordinadora por un Atoyac con vida, 2014, 2018; Martínez, 2021; L. Pérez entrevista personal, junio 3, 2021).

Adicionalmente, la Planta de tratamiento de aguas residuales de San Martín Texmelucan “Filtros Rociadores de San Martín

Texmelucan” construida en 1995, estuvo sin funcionamiento entre los años 2000 y 2016, pagando a CONAGUA sanciones por incapacidad técnica para el tratamiento de aguas residuales “400 mil pesos trimestrales” (Espinosa, 2016; Mastreta, 2016) aguas que se vertieron sin tratamiento a los canales de riego lo que afectó directamente a la producción agrícola los usuarios del Distrito de Riego (DR) 056 Atoyac-Zahuapan. Existe en la zona otra Planta de Tratamiento cuya construcción inició en 2017, ésta se ubica en la comunidad de Villa Alta (ver Figura 2), y para junio de 2021 aún se encontraba sin funcionar por falta de equipamiento. Es importante señalar que dicha PTAR fue diseñada para tratamientos biológicos, estaba destinada al tratamiento de residuos domésticos, por lo que los vertidos industriales no estaban considerados en su tratamiento, como lo manifestó a Ethos Laboratorio de Políticas Públicas (2019) un técnico de dicha instalación, además de como señala una habitante en dicho reportaje, la PTAR de Villa Alta no está instalada para sanear las aguas del Atoyac y, por lo tanto, no resuelve el problema de la población local (Pipitone; Ethos, 2019) .

Paralelamente y de acuerdo con el encargado de vigilar la obra de cabeza (A. Pérez, comunicación personal, abril 4, 2021), el intermitente funcionamiento de la planta de tratamiento, sigue siendo un factor de incertidumbre sobre la calidad del agua para el cultivo de la producción agrícola en el área de influencia del mencionado Distrito de Riego.

En este sentido, es necesario mencionar que el Distrito de Riego 056 fue creado por la Comisión Nacional de Irrigación, entre 1934 y 1945, administrado originalmente por las Juntas de Agua de campesinos organizados, fue nuevamente administrado por el gobierno federal desde 1960 y finalmente, desde 1993 transferido a los usuarios de riego (Oropeza, 1993, p. 105). Para el 2021 (CONAGUA, 2021) está agrupado en cinco módulos de riego, de los cuales Rojano, San Diego y Lucas son abastecidos con aguas del Atoyac (ver Tabla 2) y de acuerdo con Oropeza (1993) las hortalizas y demás cultivos eran regados con aguas residuales desde 1973 pues “el agua siempre lleva aceite, gasolina, petróleo, botellas de plástico y otros desechos de

San Martín lo que más perjudica son las aguas residuales y el gobierno no dice nada” (p. 88).

Tabla 2. Características generales del Distrito de Riego 056 Atoyac-Zahuapan

Módulo	Fuente de abastecimiento	Volumen de agua concesionada (Mm ³)	Superficie regada (ha)	Usuarios (No)
I. Canal Rojano	Río Atoyac	7,320	1,414.49	2,027
II. Canal San Diego	Río Atoyac	2,370	483.74	451
III. Canal San Lucas	Río Atoyac y Presa San Lucas Acotzala	4,090	655.87	1,292
IV. Canal Panotla	Río Zahuapan y Presa Panotla	9,470	1,420.16	1,940
V. Canal Atlangatepec	Río Zahuapan y Presa Atlangatepec	1,428	438.39	168
Total		24,730	4,312.65	5,878

Fuente: Oropeza (1993, p. 81); CONAGUA (2021).

En este sentido es importante mencionar que, mientras en 1991 se cultivaban 20 cultivos: acelga, alverjón, alfalfa, ajo, avena, cebolla, cilantro, col, ebo, espinaca, frijol, haba, lechuga, maíz, pastos, perejil, tomate de cáscara, trigo, yerbabuena y zanahoria (Oropeza, 1993, p. 67), derivado de las restricciones fijadas por la NOM-NTE-CCA 033/91, así como por las “enfermedades que tienen las plantas” (L. Pérez Huerta y O. Castañeda, entrevista personal, junio 3, 2021), en San Mateo Ayecac y prácticamente en el municipio de Tepetitla del Lardizábal, donde se irriga el campo con aguas del Rojano a través de los canales secundarios La Rápida y Ajejela; ahora siembra alverjón (0.50 ha), acelga (3.0 ha), alfalfa (8.0 ha), cilantro (3.0 ha), col (3.0 ha), cebolla (s.d), Chicharo (1.0 ha) espinaca (5.0 ha), frijol (5.0 ha), tomate de cáscara (15.0 ha), lechuga (5.0 ha) y maíz (148.0 ha), es decir; prácticamente 50% de los cultivos que sembraban hace 30 años han dejado de cultivarse en la zona de estudio; adicionalmente, de acuerdo con O. Castañeda y L. Pérez (comunicación personal, junio 4, 2021) en los últimos diez años se ha incursionado en la

siembra de otros cultivos, tales como: brocoli (5.0 ha), coliflor (2.0 ha), cebada (6.0 ha) y manzana (0.5 ha), aunque debido a las restricciones de CONAGUA, cerca del 90% de la superficie agrícola se siembra con maíz. En este contexto es necesario resaltar que todos los ejidatarios y pequeños propietarios de San Mateo Ayecac en menor o mayor superficie siembran maíz, sin embargo, el número de horticultores en las últimas tres décadas se ha reducido a no más de 15 personas (Castañeda y Pérez, comunicación personal, junio 4, 2021).

Paralelamente a la contaminación de agua del Atoyac, otra situación que afecta a los horticultores de la región y genera conflicto es la contaminación y reducción manantiales utilizables en el proceso de lavado de sus hortalizas, hecho que tradicionalmente se hace con manantial o canales de riego sin revestir a lo largo del Atoyac, así como en el área de lavado de hortalizas ubicada la zona del caso de San Juan Molino, hoy destinada a las instalaciones del Centro de Investigación de Biotecnología Aplicada del (CIBA) del Instituto Politécnico Nacional; ante esta situación Baños (2019) refiere los productores revelaron no tener otra alternativa para lavar sus hortalizas que hacerlo con agua (contaminada) proveniente del río Atoyac vía Canal Rojano.

En este contexto, el fenómeno de desabasto de agua no solo se da en el agua limpia de manantial, sino también en la distribuida a través de los canales de riego, mismos que al azolverse, ya no permiten el flujo de agua concesionada a los agricultores del Canal Rojano, vía el canal secundario *La Rápida* para irrigar los campos de Villa Alta, San Mateo Ayecac, Guadalupe Victoria y Tepetila (ver Figura 2), y “también afecta a productores de Xocoyucan, Tecuexcomac, Nopalucan, San Miguel del Milagro y San José Atoyac con 2,466 productores y 1, 440 hectáreas, por el cierre de canales y conflictos entre agricultores y autoridades municipales” (Otón Briones, entrevistado por Espinosa, 2019); en este punto llama la atención el reporte de afectaciones a usuarios y superficie regada reportada por Espinosa, pues supera con 429 agricultores y 14.5 hectáreas los datos reportados por CONAGUA (2021), lo que sugiere una desactualización de la base de datos de dicha institución con relación al número de

agricultores y superficie irrigada al menos en el Módulo I Canal Rojano del Distrito de Riego 056.

Un último punto a considerar en la contaminación del río, es el ocasionado por la deposición de basura de origen doméstico y agrícola, pues es común encontrar al margen del Atoyac, botellas de plástico ya sean de agroquímicos o bebidas, aunque es importante mencionar que los agricultores de Ayecac se organizan mediante un sistema de faenas para la limpieza de sus canales, drenes y recolección de todo tipo de basura, sin que ésta actividad sea suficiente para evitar el hecho de la continua presencia de desechos en la zona agrícola.

Conclusiones

Tomando como base la perspectiva de *wicked problem* (WP) y su viabilidad para abordar el estudio de conflictos socio-ambientales, como los originados por la contaminación del río Atoyac en San Mateo Ayecac y en las comunidades ribereñas al río, se ha documentado el efecto de las decisiones político-económicas implementadas en el siglo XVI y que iniciaron con la reconversión productiva del valle de Nativitas, Tlaxcala, al situarse en su territorio los primeros obrajes y utilizar al río como canal de desagüe, pasando por la época Porfirista en la cual la región del sur Puebla-Tlaxcala llegó a ser la principal zona textilera del centro del país, amparada por una política pública que estimuló fiscalmente su establecimiento, bajo la justificación de ser ésta una fuente segura de generación de empleos, argumento que durante el siglo XX incentivó también el establecimiento de las industrias petrolera, metal mecánica, de alimentos y bebidas, plásticos-hules, automotriz-autopartes, cerámica, farmacéutica y maderera; en éste sentido de acuerdo con Morales (2021) existen en la ribera del Atoyac Puebla-Tlaxcala 30 parques industriales con más de 20 mil industrias; crecimiento exponencial que en el caso de la industria de la mezclilla en Tepetitla de Lardizábal se manifiesta con un incremento de cuatro a 200 establecimientos entre 2009 y 2021, de los cuales 30 están en San Mateo Ayecac (Baños, 2021), cuyas aguas residuales se vierten directamente y

sin tratamiento alguno a la red de drenaje público de la comunidad para desembocar al Atoyac.

Aunado a lo anterior, el Estado mexicano durante muchos años no consideró prioritario la implementación y seguimiento de un marco normativo pertinente en materia de cuidado a la naturaleza, y por ende hasta la última década del siglo XX que comenzaron a establecerse los límites máximos permisibles para contaminantes de aguas residuales vertidos a cauces nacionales y/o alcantarillados urbanos municipales con las NOM 001-SEMARNAT-1996 y 002-SEMARNAT-1996, o para las que llegan a ser ‘tratadas’ y pueden ser reutilizables en servicios públicos bajo la regulación de la NOM 003-SEMARNAT-1997, para el caso de lodos y biosólidos con la norma 004-SEMARNAT-2002; y las NOM 004-CONAGUA-2012 y 005-CONAGUA-2007 en materia de recarga e infiltración de acuífero a partir del agua tratada o pluvial (Rodríguez, 2020).

Cabe señalar que ante las evidencias de que en las aguas del Atoyac se detectaron sustancias de las que NOM-001 carecía de parámetros para normar descargas, tales como benceno, organoclorados y tolueno, entre otros; en julio de 2011 se emitió la “Declaratoria de clasificación de los ríos Atoyac y Xochiac, para la medición de 28 nuevos parámetros, entre los que se encuentran demanda química de oxígeno, color, toxicidad y compuestos orgánicos volátiles (Rodríguez, 2020). Los dos factores arriba descritos, el crecimiento industrial en la región y la tardía regulación ambiental del Estado mexicano, han derivado en una problemática socioambiental que se registra en un daño al ecosistema que en este documento se identifica en dos grandes rubros: daños a la salud humana y afectaciones a la agricultura de riego local.

En cuanto a los daños a la salud humana, de acuerdo con la Coordinadora por un Atoyac con Vida (2014) y Morales (2021) existen evidencias de enfermedades cutáneas, cáncer, asma bronquial, púrpura trombocitopénica idiopática, leucemia linfoblástica aguda, tumores intestinales e insuficiencia renal, aunado a el desgaste emocional de las familias y una serie de estigmatizaciones sociales y emocionales que reporta la población afectada por parte del gobierno estatal y personas ‘sanas’,

quienes ante la falta de información sobre el origen de dichas enfermedades, las han atribuido a descuido de los afectados asociándoles a deficiencias personales en su alimentación o mitos locales, situaciones que, orillaron a la población a buscar en 2003 asesoría en asociaciones parroquiales asociadas a la iglesia católica y a Organizaciones de la Sociedad Civil, quienes a su vez consultaron al Instituto de Investigaciones Biomédicas y a grupos académicos de economía, ambos de la UNAM y cuyo trabajo en conjunto lograron que el Tribunal Latinoamericano del Agua emitiera recomendaciones específicas a los municipios de la frontera Puebla-Tlaxcala en materia de prevención y remediación del agua del Atoyac, hecho que los gobiernos estatales trataron de solucionar con la instalación de plantas de tratamiento equipadas solo para atender descargas municipales y cuyo funcionamiento está en duda.

Un segundo punto de inflexión son las afectaciones a la agricultura de riego local, ésta ha ocasionado la disminución en el número de cultivos establecidos en los últimos 30 años debido tanto a las restricciones establecidas por CONAGUA y las NOM, como por las afectaciones directas a los cultivos mismos que sufren de pudrición estando en pie (Pérez, L entrevista personal, junio 4, 2021), eso sin contar el rechazo que tienen las hortalizas producidas en San Mateo Ayecac y del municipio de Tepetitla, cuando éstas son llevadas a los principales centros de distribución y comercialización tales como las Centrales de Abastos de las Cuidades de Puebla y México, lo que ha orillado a los agricultores a negar el lugar de origen de sus productos, para poder venderlos.

Adicionalmente se presentan otros fenómenos como la escasez de agua para riego, como lo sucedido en mayo de 2019, cuando al interior del Módulo I Canal Rojano, autoridades municipales taponearon los canales de riego, justificándose en sus atribuciones para prohibir el uso de agua contaminada para la producción de hortalizas, ocasionando con ello velados conflictos por el acceso al riego entre el Ayuntamiento de Tepetitla y los agricultores, quienes al carecer de referentes técnicos sobre la calidad del agua y el suelo, se resisten a dejar de cultivar sus

tierras y reclaman el acceso al agua, “aunque este contaminada” (Pérez, A. entrevista personal, abril 19, 2021).

En ese sentido, la complejidad de las causas y consecuencias de la contaminación del Atoyac, es multifactorial y difícil de definir bajo la lente de situaciones aisladas que se reflejan en daños a la salud humana, a la producción y productividad agrícola y al ecosistema en su conjunto; eso hace improbable una alternativa inmediata o definitiva para solucionarlos, por lo que es recomendable repensar en soluciones locales a partir de las necesidades y saberes de la población y los agricultores directamente afectados con el respaldo de una intervención científica-académica transdisciplinar, como la que se plantea posible mediante la perspectiva de los *wicked problem*, tema que se aborda a profundidad en el capítulo 9 de este libro.

Referencias bibliográficas

- Aguilera, C. y Ríos, A. (1991). *Tlaxcala, historia compartida: Los orígenes, antropología e historia, volumen 4*. Gobierno del estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Cultura y Artes.
- Barrios, I., Espinoza, A., Mesa, M.A., Tovilla, C. y Mendoza, M. (2021). Percepción social de la salinización del agua para uso doméstico en Puerto Madero. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 1(21), 07-34.
- El Colegio de Tlaxcala, A.C.-Consejo Económico y Social de Tlaxcala (Coltlox-CESET) (2008). *Plan Estratégico por Regiones del Estado de Tlaxcala*. Diciembre. documento inédito.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (s.f.). *Índice de Calidad del Agua. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6147/9/METODOLOG%C3%8DAICA.pdf>
- _____ (2019). *Registro Público de Derechos del Agua (REPDA)*. <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>

- _____ (2021). *Características generales del DR 056 Atoyac Zahuapan- 2021*. CONAGUA, SEMARNA. Presentación en ppt. Junio.
- DOF (1996). *NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4889589&fecha=24/06/1996
- García Cook, A. y Merino, B. L. (1991). *Tlaxcala, historia compartida: Los orígenes y arqueología, volumen 3*. Gobierno del estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Cultura y Artes.
- García, L. y Pérez. M. E. (1991a). *Tlaxcala, historia compartida: Siglo XIX, volumen 11*. Gobierno del estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Cultura y Artes.
- _____ (1991b). *Tlaxcala, historia compartida: Siglo XIX, volumen 12*. Gobierno del estado de Tlaxcala, Comisión Nacional de Cultura y Artes.
- González-J., A. (2008). De las manos tejedoras a las fábricas textiles: el nacimiento de una industria en Tlaxcala. *Tlahcuillo*, 4(2), 9-24.
- _____ (2009). *El control del agua en la cuenca de los ríos Atoyac y Zahuapan por el Estado mexicano posrevolucionario*. <https://www.researchgate.net/publication/28316225>
- _____ (2016). *Notas sobre Tlaxcala: Geografía, historia, ecología, arquitectura y antropología*. CONACULTA, Gobierno del estado de Tlaxcala, SEP, ITC.
- Google Earth (2021, septiembre). *Plataforma Google Earth. Elaboración de mapa temático*. <https://earth.google.com/web/>
- Gutiérrez, W. (2021). Estructura y acción en la contaminación del río Atoyac por la industria de la mezclilla en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. *Revista multidisciplinaria Ciencias Sociales*, 1(4).
- Greenpeace (2014). *Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac. La historia de negligencia continúa*. <https://agua.org.mx/wp-content/>

uploads/2018/02/Rios-toxicos-Lerma-y-Atoyac_
Greenpeace.pdf

- Directorio empresarial de México (2021). *Lista de empresas en Tepetitla de Lardizábal*. <https://pymes.org.mx/municipio/tepetitla-de-lardizabal-6ba0.html>
- Hernández-R., M. de L. (2011). Conflictos por agua en la microcuenca Atoyac-Zahuapan. En Jiménez, R. y Hernández-Rodríguez, M. de L. (Coords.). *Zahuapan. Río-región-contaminación*. (Pp. 233-252). El Colegio de Tlaxcala, A. C.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (2020). *Principales datos por localidad. Censo de población y vivienda 2020*. <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9>
- Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFRED) (s.f.). Estado de Tlaxcala, Tepetitla de Lardizábal. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. <https://mexico.pueblosamerica.com/i/san-mateo-ayecac/>
- Nava, R. (2011). La ruta de la industrialización en Tlaxcala: el Zahuapan y el Atoyac. En Jiménez, R. y Hernández Rodríguez, M. de L. (Coords.). *Zahuapan. Río-región-contaminación*. (Pp. 103-127). El Colegio de Tlaxcala, A. C.
- Méndez, G. T., Rodríguez, D. L. y Palacios, M. S. (2000). Impacto de riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra Latinoamericana*, 18, 277-288.
- Mollard, E. y Vargas, S. (2009). La gestión integrada del agua: Una crítica social. En Vargas, S., Soares, D., Pérez, O. y Ramírez, A. (Eds.). *La gestión de los recursos hídricos: Realidades y perspectivas, Tomo 2*. IMTA. Jiutepec, Mor.
- Olaya, S. I., Cruz, C. y Porras, F. J. (2021). Gobernanza y problemas retorcidos. Consideraciones teóricas para abordar problemas del turismo. *Investigaciones Turísticas*, (21), 176-199.

- Oropeza, C. (1993). *Implicaciones de la transferencia del Distrito de Riego 056 Atoyac-Zahuapan en Tlaxcala*. [Tesis de Licenciatura en Sociología]. Departamento de Sociología y Trabajo Social. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Perea, R. (s.f.). *Fundamentos y etapas del método etnográfico*. http://horarioscentros.uned.es/archivos_publicos/qdocente_planes/415567/epsgradotema10.pdf
- Peters, B. G. (2017). What is so wicked about wicked problems? A conceptual analysis and a research program". *Politics and Society. Routledge*, 36(3), 385-396. Doi: 10.1080/14494035.2017.1361633
- Ramírez, M. (1990). *El sistema de haciendas en Tlaxcala*. Consejo Nacional de Cultura y Artes.
- Registro Agrario Nacional-Padrón e Historia de Núcleos Agrarios (RAN-PHINA) (2021). *Datos sobre el ejido San Mateo Ayecac. Tlaxcala*. www.gob.mx/ran.phinan.ra.gob.mx
- Rittel, H. y Webber, M. (1973) Dilemas en una teoría general de la planificación. *Política Sci* 4, 155-169. <https://doi.org/10.1007/BF01405730>
- Rocha, R. F. (2014). *Enfoque Sociotécnico, Hidrosocial & Socionatural*. V. Claudín y N.C. Post Uiterweer, PARAGUAS, Justicia Hídrica. www.redandina-paraguas.net y www.justiciahidrica.org
- Rodríguez, L. y Morales, J. (Coord.) (2014). *Contaminación del Atoyac, daños ambientales y tecnologías de la mitigación*. Universidad Autónoma Metropolitana, Miguel Ángel Porrúa.
- Sandoval, V. A. M., Gordillo, M. A. J. y Villegas, V. E. C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 34(12), 880-887.
- Segundo, T. E., Soto, M. E. S., Juárez, S. L. F., García, N. E. y García, G. E. (2009). Efecto del agua residual de la industria textil en el crecimiento radicular de *Lactuca sativa* y *Licopersicum esculentum*. Memorias de resúmenes del 8º Congreso Internacional, 14º

- Nacional de Ciencias Ambientales y 3er Congreso de Medio Ambiente. Tlaxcala. 1-5 de junio del 2009. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 25 (suplemento 1).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2008a). *Agenda ambiental del estado de Tlaxcala*. SEMARNAT, Gobierno del estado de Tlaxcala, CONAGUA, CONAFOR, PROFEPA.
- _____ (2008b). *Programas municipales de protección al ambiente*. SEMARNAT-Delegación Tlaxcala.
- Soto, C. O., Carrillo-C., J. y Suárez, S.J. (2011). Concentraciones de metales y metaloides en sedimentos del río Zahuapan, Tlaxcala, México. En Jiménez, R. y Hernández-Rodríguez, M. de L. (Coords.). *Zahuapan. Río-región-contaminación*. (Pp. 57-78). El Colegio de Tlaxcala, A. C.
- Suárez, S. J., Carreón, M. F., Chamizo, S. y Orozco, S. (2011). Disponibilidad y contaminación de agua en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. En Jiménez, R. y Hernández-Rodríguez, M. de L. (Coords.). *Zahuapan. Río-región-contaminación*. (Pp. 33-55). El Colegio de Tlaxcala, A. C.
- Villalobos-P., R., Flores, A. R. y Gómez, S. (2011). Detección de mezclas complejas de sustancias con efectos genotóxicos en el sistema hidrológico Atoyac-Zahuapan (SH-AZ) Tlaxcala. En Jiménez, R. y Hernández-Rodríguez, M. de L. (Coords.). *Zahuapan. Río-región-contaminación*. (Pp. 23-32). El Colegio de Tlaxcala, A. C.

Notas periodísticas y reportajes

- Baños, T. (2019). *Un canal de riego está por secarse, en Tepetitla*. www.elsoldetlaxcala.com.mx 10619. <http://pinceldeluzprensa.com/2019/05/22/crece-la-disputa-por-el-agua-agricultores-reabren-por-la-fuerza-canal-de-riego-en-tepetitla/> 1 de junio

- Baños, T. (2021). *San Mateo Ayecac, el nuevo “rey” de la mezclilla*. <https://www.elsoldetlaxcala.com.mx/local/municipios/san-mateo-ayecac-tepetitla-nuevo-rey-de-la-mezclilla-6948987.html#>
- Castillo, K. (2018). Crece pandemia de cáncer e insuficiencia renal por vivir cerca del Atoyac y Zahuapan. *Diario Urbano*. 22 marzo. <http://urbanopuebla.com.mx/sociedad/noticia/4911-crece-pandemia-de-c%C3%A1ncer-e-insuficiencia-renal-por-vivir-cerca-del-atoyac-y-zahuapan.html>
- Coordinadora por un Atoyac con Vida (2014). *Nos están matando. No hay Justicia Social sin justicia ambiental*. https://mx.video.search.yahoo.com/search/video;_ylt=AwrEzeJN0vRfqzUAKIHu8Qt.;_ylu=c2VjA3NIYXJjaAR2dGlkAw--_ylc=X1MDMjExNDcxMjA0NgRfcgMyBGFjdG4DY2xrBGNzcmNwdmlkA2d2MHQ2ekV3TGpHNzlpT3ZYlJbFY1FGZk1qZ3dOZ0FBQUFCdDdfcXkEZnIDbWNhZmVlBGZyMgNzYS1ncARncHJpZANfMTF1ZlpqOVNIZXVVSXkLSnhETIRBBG5fcNsdAMyNQRuX3N1Z2cDMARvcmlnaW4DbXgudmlkZW8uc2VhcmNoLnIhaG9vLmNvbQRwb3MDMARwcXN0cgMEcHFzdHJsAwRxc3RybAM2MgRxdWVyeQNBdG95YWMIMjBUbGF4Y2FsYSUyMENvb2RhbWlhY2klQzMIQjNuJTlwrRnJheSUyMEp1bG1hbiUyMEDhcmNlcwR0X3N0bXADM-TYwOTg4MDE4OQ--?p=Atoyac+Tlaxcala+Contamiaci%C3%B3n+Fray+Julian+Garces&ei=UTF-8&fr2=p%3As%2Cv%3Av%2Cm%3Asa&fr=mcafee&guccounter=1#id=3&vid=cbfb2613a52dee9702bc892a8977edf0&action=view
- Coordinadora por un Atoyac con Vida (2018). *Nos están matando. Agua, salud y medio ambiente en el río Atoyac. Campaña por un Atoyac con vida*. https://mx.video.search.yahoo.com/search/video;_ylt=AwrEzeJN0vRfqzUAKIHu8Qt.;_ylu=c2VjA3NIYXJjaAR2dGlkAw--_ylc=X1MDMjExNDcxMjA0NgRfcgMyBGFjdG4DY2xrBGNzcmNwdmlkA2d2MHQ2ekV3TGpHNzlpT3ZYlJbFY1FGZk1qZ3dOZ0FBQUFCdDdfcXkEZnIDbWNhZmVlBGZyMgNzYS1ncARncHJpZANfMTF1ZlpqOVNIZXVVSXkLSnhETIRBBG5fcNsdAMyNQRuX3N1Z2cDMARvcmlnaW4DbXgudmlkZW8uc2VhcmNoLnIhaG9vLmNvbQRwb3MDMARwcXN0cgMEcHFzdHJsAwRxc3RybAM2MgRxdWVyeQNBdG95YWMIMjBUbGF4Y2FsYSUyMENvb2RhbWlhY2klQzMIQjNuJTlwrRnJheSUyMEp1bG1hbiUyMEDhcmNlcwR0X3N0bXADM-TYwOTg4MDE4OQ--?p=Atoyac+Tlaxcala+Contamiaci%C3%B3n+Fray+Julian+Garces&ei=UTF-8&fr2=p%3As%2Cv%3Av%2Cm%3Asa&fr=mcafee&guccounter=1#id=3&vid=cbfb2613a52dee9702bc892a8977edf0&action=view

zlpT3ZYLjBFY1FGZk1qZ3dOZ0FBQUFCdDdf-
cXkEZnIDbWNhZmVIBGZyMgNzYS1ncARncHJp-
ZANfMTFIZlPqOVNIZXVVSkxLSnhETIRBBG5fc-
nNsdAMyNQRuX3N1Z2cDMARvcmlnaW4DbX-
gudmlkZW8uc2VhemNoLnlhaG9vLmNvbQRwb-
3MDMARwcXN0cgMEcHFzdHJsAwRxc3RybAM-
2MgRxdWVyeQNBdG95YWMIMjBUbGF4Y2FsY-
SUyMENvbnRhbWlhY2klQzMIQjNuJTIwRnJhe-
SUyMEp1bGhhbiUyMEDhcmNlcwR0X3N0bXAD-
MTYwOTg4MDE4OQ--?p=Atoyac+Tlaxcala+Con-
tamiaci%C3%B3n+Fray+Julian+Garces&ei=U-
TF-8&fr2=p%3As%2Cv%3Av%2Cm%3Asa&fr=m-
cafee#id=1&vid=b4d8c8da33ebe0dbcfef885ced55b-
20c&action=view

- Espinosa, C. (2016). Sin funcionar plantas de tratamiento en 5 municipios de la región de Texmelucan. *E-consulta* <http://admin.municipiospuebla.mx/nota/2016-12-29/interiores/sin-funcionar-plantas-de-tratamiento-en-5-municipios-de-la-regi%C3%B3n-de>
- Espinosa, S. (2019). Crece la disputa por agua, agricultores reabren por la fuerza canal de riego en Tepetitla. *Pincel de luz prensa*. <https://pinceldeluzprensa.com/2019/05/22/crece-la-disputa-por-el-agua-agricultores-reabren-por-la-fuerza-canal-de-riego-en-tepetitla/>
- Mastreta, S. (2016). 16 años lleva parada la planta de tratamiento de Texmelucan. *Nuestro mundo*. <https://archivo.mundonuestro.mx/index.php/accion-civil/rio-atoyac/item/309-16-anos-lleva-parada-la-planta-de-tratamiento-de-texmelucan>
- Marker Data México (2019). *Colonia San Mateo Ayecac, Tepetitla de Lardizábal, en Tlaxcala*. <https://www.marketdatamexico.com/es/article/Colonia-San-Mateo-Ayecac-Tepetitla-Lardizabal-Tlaxcala>
- Morales, O. (2021). *Atoyac, el río que mata*. <https://www.youtube.com/watch?v=RnLau35pjSU>
- Pagán, R. H. (2016). El río Atoyac, riesgo ecológico o atentado a la salud. *La Jornada de Oriente*. <http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2016/05/11/el-rio-atoyac->

- riesgo-ecologico-o-atentado-a-la-salud/
- Pipitone, L y Ethos Laboratorio de Política Pública (2019). *Río Atoyac: el lado oscuro de la mezclilla*. <https://www.milenio.com/estados/rio-atoyac-el-lado-oscuro-de-la-mezclilla?fbclid=IwAR2feP0k30hzAECqprBb2N09Emy-YiXenlul0q5RnjK-CTCFt0r-qRevkJ8>
- Pueblosamerica (2021). *Datos sobre San Mateo Ayecac, Tlaxcala*. <https://mexico.pueblosamerica.com/i/san-mateo-ayecac/>
- Rankeado de empresas en México (2021). *Tepetitla de Lardizábal Tlaxcala, empresas manufactureras*. <https://rankeando.com/municipios/tepetitla-de-lardizabal-tlax/giros/industrias-manufactureras>
- Rosas, O. (2017a). La CNDH y el río Atoyac: riesgo de simulación oficial. *La Jornada de Oriente*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/la-cndh-rio-atoyac-riesgo-simulacion-oficial/>
- _____ (2017b). El río Atoyac y el PED 2017–2021: intensificar la crisis ambiental y de salud. *La Jornada de Oriente*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/rio-atoyac-ped-2017-2021-intensificar-la-crisis-ambiental-salud/>
- _____ (2018a). Una nueva oportunidad para la cuenca Atoyac-Zahuapan. *La Jornada de Oriente*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/una-nueva-oportunidad-para-la-cuenca-atoyac-zahuapan/>
- _____ (2018b). *Cuenca Atoyac-Zahuapan: un año de trabajo comunitario frente a la simulación 21032018*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/atoyac-zahuapan-ano-frente-simulacion/>
- Trejo, C. (2020). *México: Existen demandas por contaminación del Río Atoyac, es el segundo río más contaminado del país*. <https://agua.org.mx/mexico-existen-demandas-por-contaminacion-del-rio-atoyac-es-el-segundo-rio-mas-contaminado-del-pais-trejo-camino-megalopolis/>
- Zambrano, J. (2021). *Revelan imágenes de satélite polución en el río Atoyac*. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/contaminacion-atoyac-afecta-millones->

personas-unam

Zamudio, I. (2015). *Clausuran 9 textileras por contaminar el río Atoyac*. <https://www.milenio.com/estados/clausuran-9-textileras-contaminar-rio-atoyac>.

Conferencias y presentaciones

Martínez, E. (2021). El valor del agua en la cuenca del Alto Atoyac. UPAEP, Puebla Pue., marzo 24. <https://www.facebook.com/CeasPueblaOficia>

Rodríguez, E. (2020). Saneamiento de la Cuenca Atoyac-Zahuapan. Tlaxcala, Tlax., diciembre 2.



CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO- GEOGRÁFICA DEL PAISAJE EN LA MICROCUCENCA ATOYAC-XOCHIAC, SUBCUCENCA ALTO BALSAS

Ángel David Flores-Domínguez¹

Ángel G. Priego-Santander²

Introducción

La problemática ambiental de los ríos Atoyac y Xochiac, evidenciada en su contaminación hídrica (Bravo-Inclán, 2015; Ramírez-Varela y López-Santos, 2018; Altieri, 2019), requiere analizarse desde un marco geográfico más amplio, como el enfoque de cuenca, permitiendo comprender la complejidad de los componentes físicos, naturales y humanos dentro de su área de distribución, en los límites entre Puebla y Tlaxcala (ver Figura 1). Así, el reconocimiento de la dinámica hidrográfica y los factores que condicionan la disponibilidad y calidad hídrica superficial y en general del paisaje, servirán de base material para una gestión más adecuada al contexto actual de degradación que la caracteriza.

Al respecto, los fundamentos teórico-metodológicos de la Geografía Física Compleja o Ciencia del Paisaje, constituyen un referente analítico para explicar el origen, estructura, evolución y dinámica de los sistemas naturales, mediante la organización taxonómica del espacio y su delimitación en complejos

¹ Profesor-Investigador de El Colegio de Tlaxcala, A.C., correo-e: angeldavid@coltlax.edu.mx

² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM., correo-e: apriego@ciga.unam.mx

geográficos denominados unidades de paisaje (Bocco et al., 2010). De esta manera, el objetivo de este trabajo es mostrar la caracterización y representación cartográfica, de los paisajes que integran las diferentes zonas hídricas funcionales de la microcuenca Atoyac-Xochiac, perteneciente al sistema Alto Atoyac, con la finalidad de que esta información pueda servir de base a futuros trabajos para la identificación de problemáticas ambientales y la planificación de acciones orientadas al manejo integral y ordenamiento territorial de la cuenca.

En el primer apartado, se sintetiza los fundamentos teórico-conceptuales del enfoque de cuencas hidrográficas como unidades naturales de apoyo a la gestión pública de los recursos, seguido de los postulados de la Geografía Física Compleja o Ciencia del Paisaje y su utilidad en la planificación y ordenamiento territorial a escala regional-local.

El apartado siguiente muestra la metodología general seguida para 1) la delimitación de las zonas funcionales de la microcuenca; y 2) la construcción de unidades físico-geográficas de paisaje. Los resultados se presentan en el apartado siguiente, organizados en función de la caracterización y cartografía de unidades de paisaje lograda a escala 1:50,000, seguida de un análisis al interior de cada componente del paisaje. Ante las limitaciones de espacio para el manuscrito, se sugiere que el lector consulte las referencias bibliográficas señaladas, para una mayor comprensión de los enfoques teóricos utilizados y el proceso metodológico.

Finalmente, se presentan algunas reflexiones a manera de conclusión, sobre el aporte de este trabajo como marco geográfico de utilidad para la ordenación territorial, así como las áreas de oportunidad para profundizar en la comprensión de la situación ambiental desde perspectivas transdisciplinarias.

Fundamentación teórico-conceptual

La cuenca hidrográfica define un espacio físico, dentro del cual, los escurrimientos hídricos superficiales convergen a un mismo punto de salida de la cuenca, o hacia un cuerpo de agua interior, según sea exorreica o endorreica. Bajo esta lógica,

la cuenca puede considerarse como un sistema de relieves conformados en un gradiente altitudinal, lo cual condiciona la dinámica gravitacional de escurrimientos y materiales sólidos, al tiempo que se evidencia la influencia del clima y los procesos geológicos que originaron al sistema de relieves. Esta interacción entre relieve, clima y geología, a su vez, es responsable de la diversidad edáfica y biológica, la cual es modificada por la apropiación cultural y la gestión del territorio.

En este sentido, conocer la dinámica hídrica natural de la cuenca y la estructura del paisaje, permite orientar la gestión, hacia la identificación de umbrales biofísicos y sociales para el manejo sustentable del sistema, hacia la valoración de afectaciones debido al sobreuso, o bien para definir acciones concretas de restauración (Cotler y Priego-Santander, 2004; Cotler, 2010). Las cuencas como unidades espaciales, poseen una organización jerárquica interna (ej. cuenca principal, subcuencas, microcuencas), que facilita la gestión hídrica territorial, en términos de las acciones a instrumentar para atender problemáticas específicas (Cotler et al., 2013).

Adicionalmente, el reconocimiento de las posibilidades y limitaciones de uso del territorio ha sido el propósito de los instrumentos de política pública denominados ordenamientos, los cuales se valen de unidades cartográficas como las planteadas en este documento. Así, la construcción de unidades de paisaje, permite inferir procesos que lo originaron, su evolución natural, la conformación actual y los tipos de apropiación cultural reflejados en los usos del suelo.

La representación cartográfica de la estructura y dinámica de los paisajes, se ha utilizado para elaborar regionalizaciones naturales (Bollo-Manent et al., 2015), ordenamientos ecológicos del territorio (Priego-Santander y Bocco, 2015), cálculos de potenciales naturales (Flores-Domínguez y Priego-Santander, 2019), conservación de la geodiversidad (Zaragoza-Álvarez et al., 2013), entre otras aplicaciones. Dichos trabajos se fundamentan en la Ciencia del Paisaje proveniente de la escuela geográfica rusa, adaptada al contexto del trópico latinoamericano (Mateo, 1984), y específicamente en México por Priego-Santander et al. (2010).

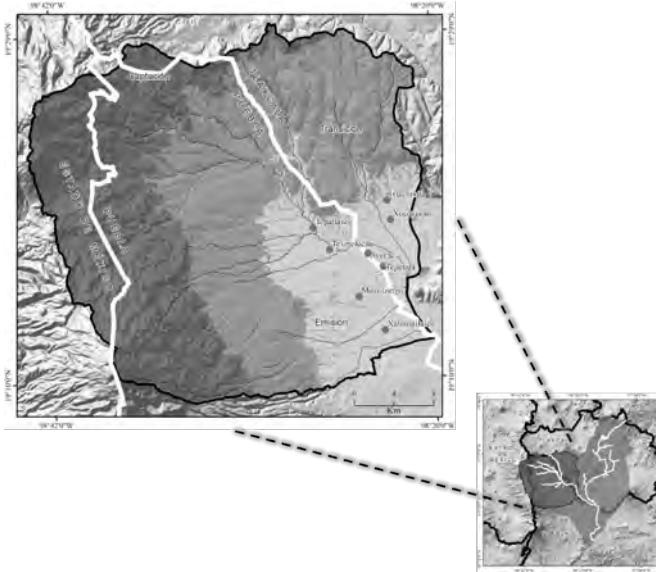
Metodología

Delimitación de la microcuenca

Para la delimitación, se definió una localización a manera de desembocadura de la microcuenca (19°12'53.15"N y 98°20'43.84"O), cercana a la localidad Santiago Michac, municipio de Nativitas, Tlaxcala. Esto permitió asegurar que en el área quedarán incluidos los terrenos agrícolas irrigados por el sistema hídrico Atoyac-Xochiac, pertenecientes a los municipios de Tepetitla de Lardizabal e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, en el estado de Tlaxcala (ver Figura 1).

Se utilizó el módulo *Hidrology* del programa ArcMap© v.10.2, iniciando con el cálculo de la dirección de los escurrimientos (herramienta *Flow direction*) a partir de la cartografía de drenaje superficial (INEGI, 2014) y de un modelo de elevación con resolución de 30 metros (ESDS, 2021). La dirección de los escurrimientos sirvió para definir el polígono de la microcuenca (herramienta *Basin*). Al interior de la microcuenca se definieron las áreas de captación, transición y emisión, a partir de criterios altimétricos y el orden de las corrientes (Garrido et al., 2010).

Figura 1. Mapa de ubicación de la microcuenca Atoyac-Xochiac (recuadro principal) al interior de la subcuenca Alto Atoyac (área sombreada en el recuadro inferior)



Generación de unidades de paisaje

Se delimitaron unidades de paisaje en la escala 1:50,000, siguiendo la metodología de Priego-Santander et al. (2010), que inicia por diferenciar grandes unidades de relieve e inferir su origen con base en la roca o sustrato litológico presente. El relieve se clasifica a través del indicador disección vertical del terreno (DV)³ agrupando los valores en intervalos de relieve: Montañas (terrenos en donde la DV es mayor a 100 m/km²), Lomeríos (DV entre 41 a 100 m/km²), Planicies acolinadas (DV entre 16 a 40 m/km²), Planicies onduladas (DV entre 2.6 a 15 m/km²) y Planicies subhorizontales (DV menor a 2.6 m/km²). A las categorías anteriores, se agregaron los valles fluviales y

³ La DV (Spiridonov, 1975) es un indicador que mide la diferencia en metros, entre la elevación mayor y la menor, dentro de una superficie de 1 km². Ver en Priego-Santander et al. (2010), el procedimiento para su cálculo en Sistemas de Información Geográfica.

pedemontes⁴, obtenidos de la cartografía 1:250,000 elaborada por IG-INE (2003), para lo cual la forma de valles y pedemontes fue redefinida en la escala 1:50,000, con apoyo de curvas de nivel obtenidas de la cartografía vectorial de INEGI (2014). Cada geoforma fue asociada a un tipo genérico de roca o litología (INEGI, 1998) y a un tipo climático (García, 1998) mediante un proceso de sobreposición cartográfica.

La construcción de unidades obedece a una lógica de integración entre componentes geográficos de mayor jerarquía, que interactúan entre sí y condicionan las propiedades de componentes de jerarquía menor (Mateo, 1984; Priego-Santander, 2010). Así, en la escala regional, el relieve y su génesis influyen en la redirección de los vientos y en la incidencia de la radiación solar (sombra orográfica), condicionando la distribución de humedad superficial y la temperatura del aire, lo cual conlleva a su vez la generación de gradientes bioclimáticos y con esto, efectos sobre la biodiversidad. Aunado a esto, el movimiento de materiales de las partes altas por efecto de la lluvia, el viento o la gravedad, es responsable en gran medida de las variaciones en las propiedades biofísicas y químicas de los suelos en las partes bajas, lo cual es de alta importancia en términos de sus posibilidades para uso humano.

De esta manera, la integración de unidades geomorfo – lito – climáticas, se subdividió en unidades menores, definidas por una categoría de inclinación del terreno, que posibilita la presencia de determinadas asociaciones vegetales y usos del suelo, sobre tipos específicos de suelos. Para efectos de este documento, las unidades menores se denominaron unidades de paisaje y se reconocen por un número arábigo consecutivo. La inclinación del terreno fue calculada a partir del modelo de elevación, mientras que la vegetación y usos del suelo, así como los tipos de suelo, se obtuvieron de INEGI (2017 y 2007, respectivamente). Los análisis cartográficos y la generación de mapas se realizaron en ArcMap© v.10.2.

⁴ Los valles y pedemontes son formas de relieve que se reconocen en el terreno a través de curvas de nivel. Ver en Priego-Santander et al. (2010), el procedimiento para su levantamiento en Sistemas de Información Geográfica.

Si bien las unidades de paisaje sintetizan la compleja estructura y funcionamiento de los componentes que la integran, para facilitar el análisis se presenta además una breve descripción de los componentes relieve, cobertura / uso del suelo y tipos de suelo, al interior de cada zona hidrológica, adicionando en cada componente, una valoración del nivel de degradación del suelo (INEGI, 2013).

Resultados

Unidades de paisaje en la microcuenca

La microcuenca está integrada por tres zonas hidrológicas funcionales, de las cuales, la zona de transición es la más extensa (49,000 Ha = 41% del total), seguida de la zona de captación (45,000 ha = 38% del total) y finalmente la zona de emisión (25,000 ha = 21% del total), abarcando en conjunto 118,960 ha. Al interior de las tres zonas se delimitaron 99 unidades de paisaje (ver Tabla 1 y Figura 2a, b, c, d).

Las tres unidades principales, dada su extensión superficial, son la número 20 (complejos de cumbres, laderas y barrancos con inclinaciones del terreno entre 10 y 15°, dentro de montañas ligeramente diseccionadas formadas por roca andesita y toba intermedia, producto de eventos volcánicos, en clima semifrío subhúmedo), que abarca 12,180 ha y está distribuida ampliamente por toda la zona de captación, hacia el sector poniente que corresponde a laderas del volcán Iztaccíhuatl y del Espolón de la Sierra Nevada (ver Figura 2a).

La segunda unidad más importante es la número 55 (complejos de cumbres, laderas y barrancos con inclinaciones entre 5 y 10°, dentro de montañas ligeramente diseccionadas, de origen volcánico formadas por andesita y toba intermedia, en clima templado subhúmedo). Abarca 11,602 Ha distribuidas en la zona de transición que ocurre al norte de la microcuenca, en terrenos de los municipios de Nanacamilpa, Españaita e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros (ver Figura 2b).

La tercera unidad es la número 21 (complejos de cumbres, laderas y barrancos con inclinaciones entre 5 y 10°, dentro de

montañas volcánicas ligeramente diseccionadas, formadas por andesita y toba intermedia en clima semifrío subhúmedo). La unidad abarca 10,524 ha, distribuidas también en la zona de captación hídrica (ver Figura 2a). Las tres unidades en conjunto suman casi 30% de la superficie total de la microcuenca.

Tabla 1. Caracterización físico-geográfica del paisaje en la microcuenca Atoyac-Xochiac. La Tabla funciona a su vez como leyenda temática del mapa de unidades de paisaje de la Figura 2a, b, c, d] en donde los números en negritas corresponden a cada unidad de paisaje

Clima	Color en el mapa	Relieve	Tipo de roca o sustrato litológico	Inclinación del terreno							
				30-45	20-30	15-20	10-15	5-10	3-5	1-3	<1
Frío [E(T) CCw]	Montañas en clima frío	Montañas volcánicas medianamente diseccionadas (251<Dv<500)	Andesita y Toba intermedia	1	2	3	-	-	-	-	-
Semifrío subhúmedo [CB (w2)]	Montañas en clima semifrío subhúmedo	Montañas volcánicas fuertemente diseccionadas (Dv≥501)	Andesita y Toba intermedia	4	5	6	-	-	-	-	-
		Montañas volcánicas medianamente diseccionadas (251<Dv<500)	Andesita y Toba intermedia	7	8	9	10	11	-	-	-
		Montañas tectónicas medianamente diseccionadas (251<Dv<500)	Brecha sedimentaria	-	14	15	16	17	-	-	-
		Montañas volcánicas ligeramente diseccionadas (101<Dv<250)	Andesita y Toba intermedia	-	18	19	20	21	22	23	24
		Montañas tectónicas ligeramente diseccionadas (101<Dv<250)	Brecha sedimentaria	-	-	25	26	27	28	29	-

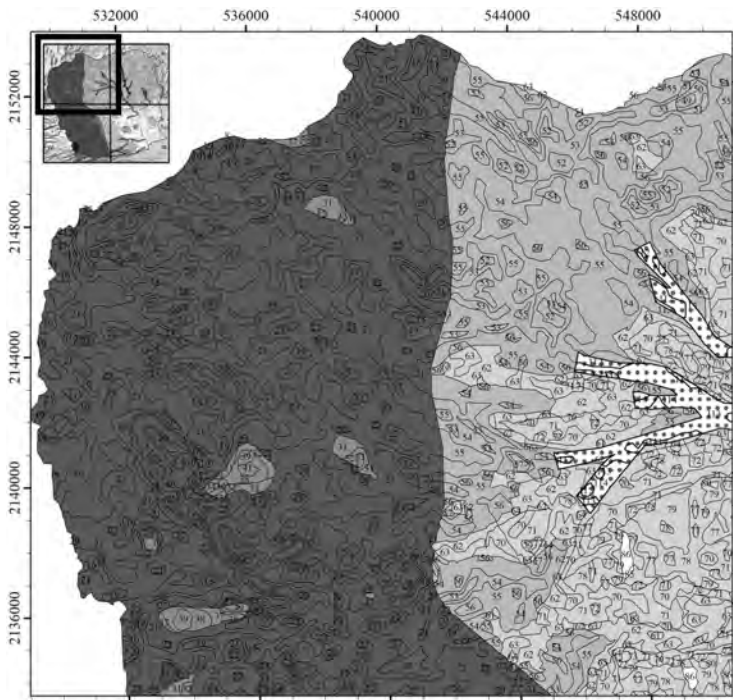
Caracterización físico-geográfica del paisaje en la microcuenca
Atoyac-Xochiac, subcuenca Alto Balsas

Templado subhúmedo [C(w1), C(w2)]	Lomeríos en clima semifrío subhúmedo	Lomeríos volcánicos fuertemente diseccionados (81<Dv<100)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	31	32	33	34
		Lomeríos tectónicos fuertemente diseccionados (81<Dv<100)	Brecha sedimentaria	-	-	-	-	-	35	36	
		Lomeríos volcánicos medianamente diseccionados (61<Dv<80)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	37	38	39	40
		Lomeríos volcánicos ligeramente diseccionados (41<Dv<60)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	-	41	-	-
	Montañas en clima templado subhúmedo	Montañas volcánicas medianamente diseccionadas (251<Dv<500)	Andesita y Toba intermedia	-	49	50	51	-	-	-	-
		Montañas volcánicas ligeramente diseccionadas (101<Dv<250)	Andesita y Toba intermedia	-	52	53	54	55	56	57	-
		Montañas volcánicas ligeramente diseccionadas (101<Dv<250)	Basalto y Brecha volcánica básica	-	-	-	58	59	-	-	-
	Lomeríos en clima templado subhúmedo	Lomeríos volcánicos fuertemente diseccionados (81<Dv<100)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	61	62	63	64	65
		Lomeríos volcánicos fuertemente diseccionados (81<Dv<100)	Basalto y Brecha volcánica básica	-	-	-	-	66	67	68	-
		Lomeríos volcánicos medianamente diseccionados (61<Dv<80)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	69	70	71	72	73
		Lomeríos volcánicos medianamente diseccionados (61<Dv<80)	Basalto y Brecha volcánica básica	-	-	-	-	-	74	75	76
		Lomeríos volcánicos ligeramente diseccionados (41<Dv<60)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	77	78	79	80

Planicies acolinadas en clima templado subhúmedo	Planicies volcánicas acolinadas fuertemente diseccionadas (31<Dv<40)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	-	85	86	87
	Planicies aluviales acolinadas fuertemente diseccionadas (31<Dv<40)	Depósitos aluviales	-	-	-	-	-	89	90	91
	Planicies volcánicas acolinadas medianamente diseccionadas (21<Dv<30)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	92	93	94	95
	Planicies volcánicas acolinadas medianamente diseccionadas (21<Dv<30)	Basalto y Brecha volcánica básica	-	-	-	-	-	96	97	-
	Planicies aluviales acolinadas medianamente diseccionadas (21<Dv<30)	Depósitos aluviales	-	-	-	-	98	99	100	101
	Planicies volcánicas acolinadas ligeramente diseccionadas (16<Dv<20)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	-	-	102	103
	Planicies aluviales acolinadas ligeramente diseccionadas (16<Dv<20)	Depósitos aluviales	-	-	-	-	-	104	105	106
	Planicies volcánicas onduladas fuertemente diseccionadas (11<Dv<15)	Andesita y Toba intermedia	-	-	-	-	-	-	-	107
Planicies aluviales onduladas fuertemente diseccionadas (11<Dv<15)	Depósitos aluviales	-	-	-	-	-	-	-	109	
Valles en clima templado subhúmedo	Valles fluviales	Depósitos aluviales	-	110	111	112	113	114	115	116

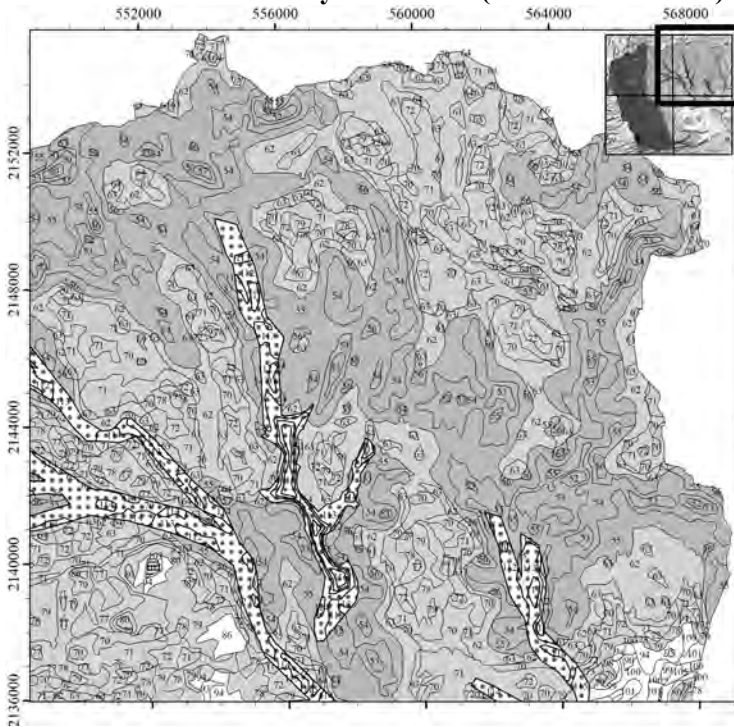
Nota. Si bien, la numeración de las unidades va del 1 al 116, los números 12, 13, 30, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 60, 81, 82, 83, 84, 88 y 108, están ausentes en la tabla y mapa, dado que, en la superposición cartográfica entre unidades de paisaje y áreas funcionales de la microcuenca, quedaron fuera del área de trabajo. Si se requiere conocer la cartografía con las 116 unidades, se puede solicitar a los autores.

Figura 2a. Mapa de unidades de paisaje físico-geográficos de la microcuenca Atoyac-Xochiac (cuadrante noroeste)



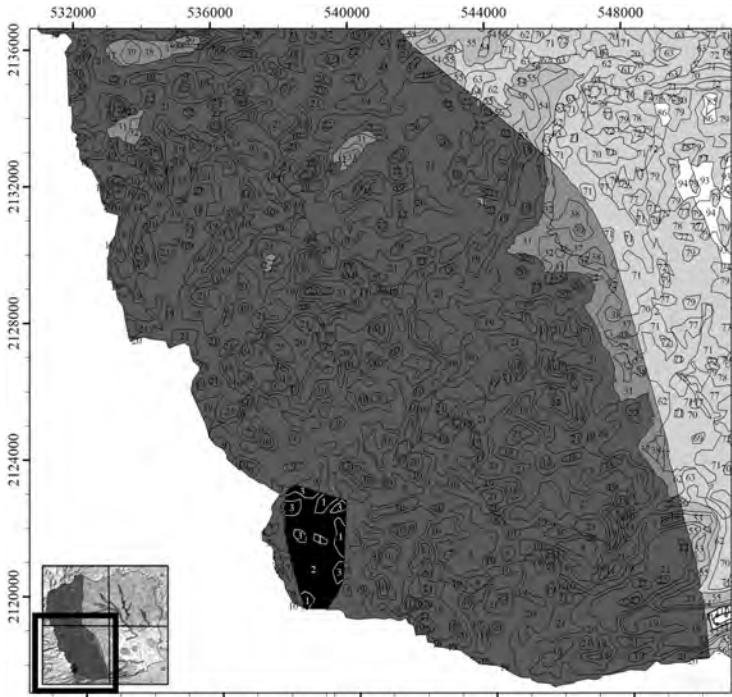
Nota. La segmentación en cuadrantes se utilizó para presentar el mapa en una escala ajustada a la hoja de impresión. Los números indican cada unidad, mientras que la leyenda del mapa corresponde a la Tabla 1.

Figura 2b. Mapa de unidades de paisaje físico-geográficos de la microcuenca Atoyac-Xochiac (cuadrante noreste)



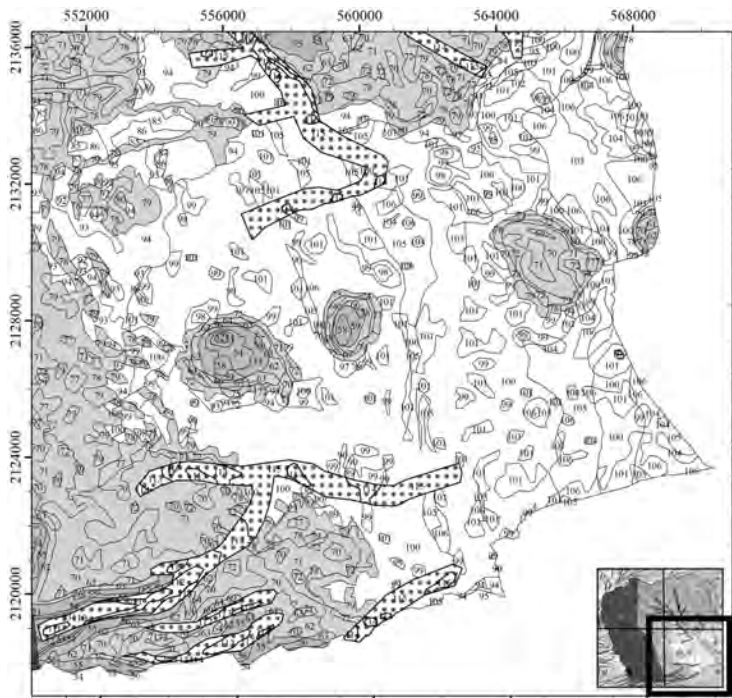
Nota. La segmentación en cuadrantes se utilizó para presentar el mapa en una escala ajustada a la hoja de impresión. Los números indican cada unidad, mientras que la leyenda del mapa corresponde a la Tabla 1.

Figura 2c. Mapa de unidades de paisaje físico-geográficos de la microcuenca Atoyac-Xochiac (cuadrante suroeste)



Nota. La segmentación en cuadrantes se utilizó para presentar el mapa en una escala ajustada a la hoja de impresión. Los números indican cada unidad, mientras que la leyenda del mapa corresponde a la Tabla 1.

Figura 2d. Mapa de unidades de paisaje físico-geográficos de la microcuenca Atoyac-Xochiac (cuadrante sureste)

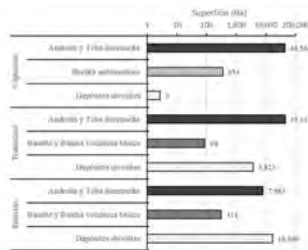
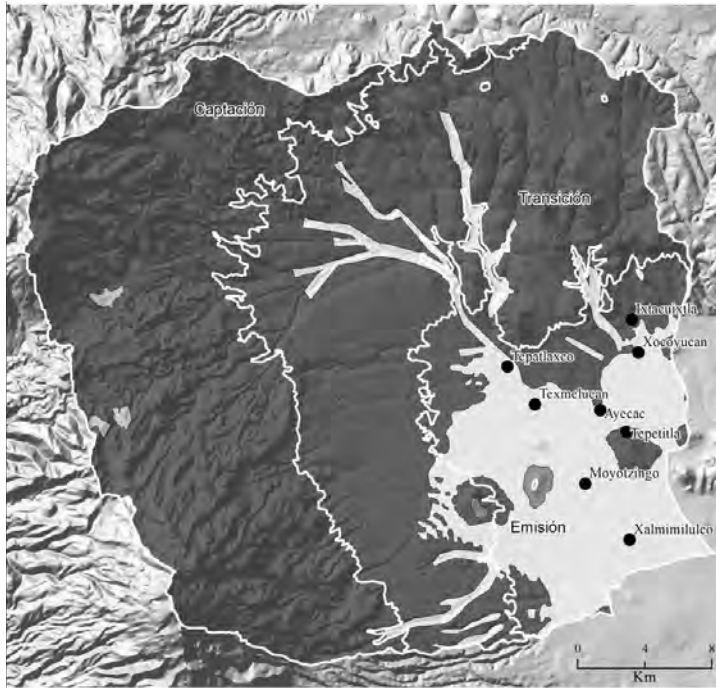


Nota. La segmentación en cuadrantes se utilizó para presentar el mapa en una escala ajustada a la hoja de impresión. Los números indican cada unidad, mientras que la leyenda del mapa corresponde a la Tabla 1.

Descripción y análisis de los componentes del paisaje al interior de la microcuenca

Geomorfología. La zona de captación hídrica ubicada en la parte más elevada de la microcuenca, corresponde principalmente a montañas, formadas por rocas volcánicas del tipo de la andesita y toba intermedia (43,180 ha = 96% de la zona). En la zona de transición, abundan los lomeríos (27,540 ha) y montañas (16,314 ha), que en conjunto abarcan 90% del área (ver Figura 3). Estos relieves abruptos, tuvieron su origen en diferentes eventos

Figura 4. Tipos litológicos al interior de las zonas hídricas funcionales



Asimismo, se puede observar que, en la zona de emisión, en la parte baja de la microcuenca, el relieve dominante corresponde a planicies acolinadas (ver Figura 3), formadas mayormente por rocas de basalto y brecha volcánica básica, que dan cuenta también de su origen volcánico. En menor proporción existen unidades de lomeríos volcánicos formados por andesita y toba intermedia y valles originados por procesos fluviales en los

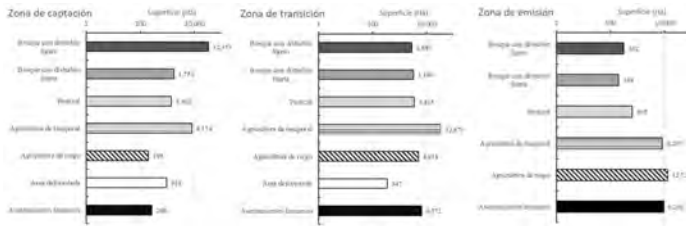
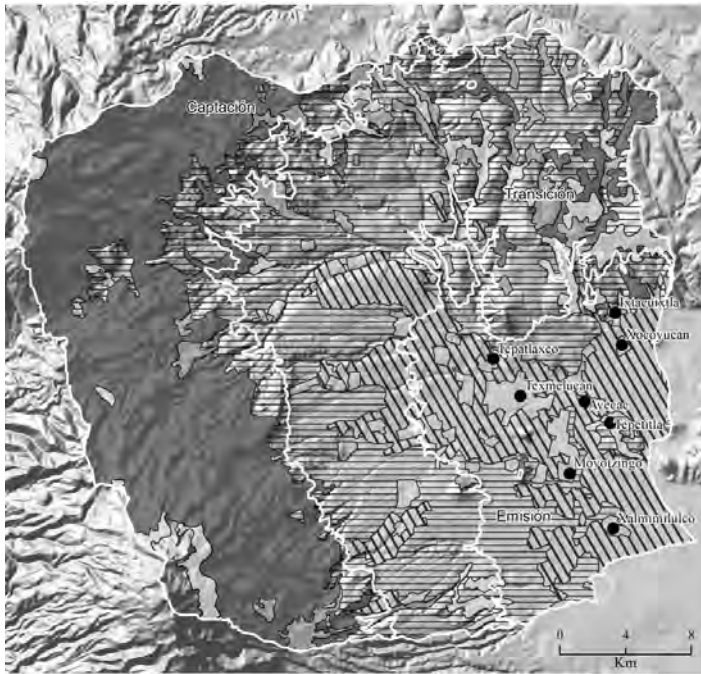
cuales se han depositado materiales como rocas, gravas y arenas debido al arrastre de las lluvias y los escurrimientos hídricos superficiales (ver Figura 4).

Cobertura y uso del suelo. En la zona de captación, la vegetación o cobertura del suelo es dominada por bosques templados, principalmente de coníferas, los cuales presentan un grado ligero de disturbio humano (32,353 ha = 70% de la zona) (ver Figura 5). En un porcentaje menor, dentro de la zona de captación se practica la agricultura de temporal (18% de la zona), con cultivos de cereales como maíz y árboles frutales.

Por su parte, en la zona de transición hay una mayor prevalencia de áreas con agricultura de temporal (61% de la zona), mientras que las partes pobladas o lugares de asentamientos humanos es el segundo tipo de uso del suelo más importante (12% de la zona), seguido de las tierras con agricultura de riego (9% de la zona). Esta conformación da cuenta de la importante presión social ejercida dentro de esta zona de la microcuenca, dado que, en conjunto, estos cuatro usos del suelo están directamente relacionados con la apropiación humana y suman 82% de la superficie. En relación a la degradación del suelo, 83% de las tierras agrícolas de temporal y 90% de las tierras agrícolas, presentan algún grado de erosión del suelo, por lo cual es sumamente necesario implementar programas de control de la erosión y mejoramiento agroecológico de suelos, además de fomentar un uso agrícola sostenible.

Finalmente, el patrón previamente descrito sobre el uso del suelo, es acentuado en la zona de emisión de la microcuenca, en donde las áreas con agricultura de riego son dominantes (41% de la zona), seguidas de las zonas con asentamientos humanos (29% de la zona) y de las tierras con agricultura de temporal (26% de la zona), que en conjunto representan 96% de la superficie de emisión.

Figura 5. Tipos de uso del suelo / vegetación al interior de las zonas hídricas funcionales



Tipos de suelo. Es de destacar que, dentro de la microcuenca, la diversidad de suelos es importante, distinguiéndose hasta ocho tipos (ver Figura 6). Dentro de la zona de captación, la influencia volcánica en la formación del suelo se ve reflejada en la alta proporción de terrenos con suelo Andosol (52% de la zona), los cuales son derivados de cenizas volcánicas y dentro de sus características distintivas se pueden mencionar su alta porosidad, además del elevado contenido de compuestos derivados del

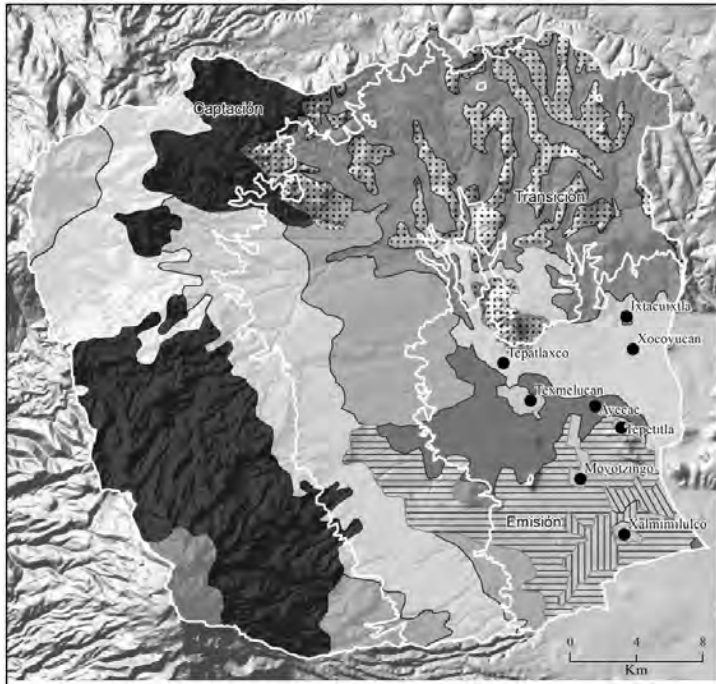
aluminio, lo cual les confiere ciertas limitaciones para el cultivo de plantas no tolerantes a dicho compuesto, a pesar de que estos suelos se consideran de alta fertilidad natural (Arnalds, 2008). Así mismo, son altamente susceptibles a la erosión.

Los terrenos con suelos Luvisol, por su abundancia, ocupan el segundo lugar en la zona (18%), los cuales se caracterizan por poseer al interior una capa diferenciada de arcilla acumulada proveniente de la superficie, que les confiere una fertilidad natural adecuada para la agricultura (Baxter, 2007). El tercer tipo es el Cambisol (16% del total de la zona), que son suelos generalmente jóvenes, poco desarrollados, no muy profundos y en los que es perceptible una fase de cambio (de ahí su nombre) entre la roca madre y el suelo formado. Se considera que su utilidad para la agricultura no es la más adecuada (INEGI, 2004). De manera conjunta, los terrenos con estos tres tipos de suelo abarcan casi 90% de la zona (ver Figura 6).

En el caso de la zona de transición, la dominancia de algún tipo es menos evidente, ya que el más abundante es el Leptosol (33% de la zona) el cual se caracteriza por ser muy delgado al estar poco desarrollado, tiene presencia de material rocoso y gravas cerca de la superficie, son susceptibles a la erosión y presentan limitaciones para la agricultura (Baxter, 2007). El segundo tipo más abundante es el Cambisol (25% de la zona) seguidos de otros seis tipos más (ver Figura 6).

Con respecto a la zona de emisión, tampoco hay una dominancia acentuada de un tipo, en donde el tipo Lixisol es el más abundante (28% de la zona) el cual tiene las características de poseer un alto contenido de arcillas por debajo de la superficie, presentando riesgo de compactación cuando se utiliza maquinaria pesada para la agricultura, además que se erosionan con facilidad (Baxter, 2007). En seguida está el suelo Cambisol (25% de la zona) y el Phaeozem (19% de la zona) que se distingue por su color oscuro, dado el alto contenido de materia orgánica, además de su gran porosidad, lo que los vuelve adecuados para la agricultura (Baxter, 2007).

Figura 6. Tipos de suelo al interior de las zonas hídricas funcionales



Problemas ambientales derivados del uso intensivo del suelo

En la zona de captación, la mayor parte de la superficie está cubierta con bosques templados, de la cual únicamente 4% posee un grado ligero a mediano de erosión del suelo (ver Figura 7). Este bajo nivel de degradación del suelo es relevante dado que los bosques cumplen una función sumamente importante en la captación y filtración de la humedad ambiental y de las

precipitaciones que ocurren ahí, limitando la cantidad y velocidad del agua que escurre de manera superficial hacia las partes más bajas y por consiguiente la erosión del suelo. Así, el agua que se filtra en el subsuelo escurre por debajo de la superficie y eventualmente, una parte emerge en manantiales de los cuales se abastece una gran cantidad de población que está asentada dentro de la microcuenca, mientras que otra parte se integrará a los acuíferos, los cuales abastecen de agua a la población para diferentes usos, incluidos el agrícola, el público-urbano, o el sector industrial. El bajo porcentaje de suelos erosionados en esta zona, no representa un problema serio de afectación de las capacidades de captación hídrica, no obstante, es deseable fomentar prácticas preventivas de control de erosión en la zona.

Dentro de la misma zona de captación, se practica agricultura de temporal, aunque en menor superficie, sin embargo, una alta proporción de las tierras agrícolas presenta evidencias de erosión (63%), lo cual compromete seriamente la capacidad productiva y las propiedades agroecológicas de los suelos en el mediano y largo plazo. Cabe mencionar que el relieve montañoso en esta zona presenta limitaciones para un buen desarrollo de la agricultura, por lo que es deseable implementar sistemas agroforestales y prácticas de conservación del suelo, que mitiguen el problema de erosión, considerando la vulnerabilidad del suelo Andosol y Luvisol a este fenómeno (ver Figura 7).

Por su parte, en la zona de transición prevalecen los campos agrícolas y los asentamientos humanos, lo cual implica una alta presión social sobre el suelo. Esta situación queda evidenciada en el alto porcentaje de degradación de los suelos en 83% de las tierras agrícolas de temporal y 90% de las tierras agrícolas, la cual se practica sobre suelos Leptosol y Cambisol en relieves dominados por lomeríos y montañas. Ante esto, se hace sumamente necesario implementar programas de control de la erosión y mejoramiento agroecológico de suelos, fomentar un uso agrícola sostenible y el diseño de planes de desarrollo urbano con una visión socioambiental.

Finalmente, el patrón de uso intensivo del suelo se magnifica en la zona de emisión, en donde casi 70% de la

superficie es agrícola y 29% son asentamientos humanos. Al respecto, es de destacar que prácticamente son ausentes las áreas con vegetación natural o al menos con presencia arbórea, que contribuyan al cumplimiento de los diversos servicios ambientales que este tipo de vegetación ofrece, ya sean aquellos vinculados con la provisión de agua, oxígeno y captación de carbono atmosférico, como aquellos que tienen que ver con la recreación y esparcimiento social. Aunado a esta problemática, las tierras agrícolas, tanto de riego como de temporal, presentan altos porcentajes de erosión (86 y 84% respectivamente) lo cual obliga a considerar acciones prontas de restauración de los suelos Lixisol, Cambisol y Phaeozem presentes en la zona.

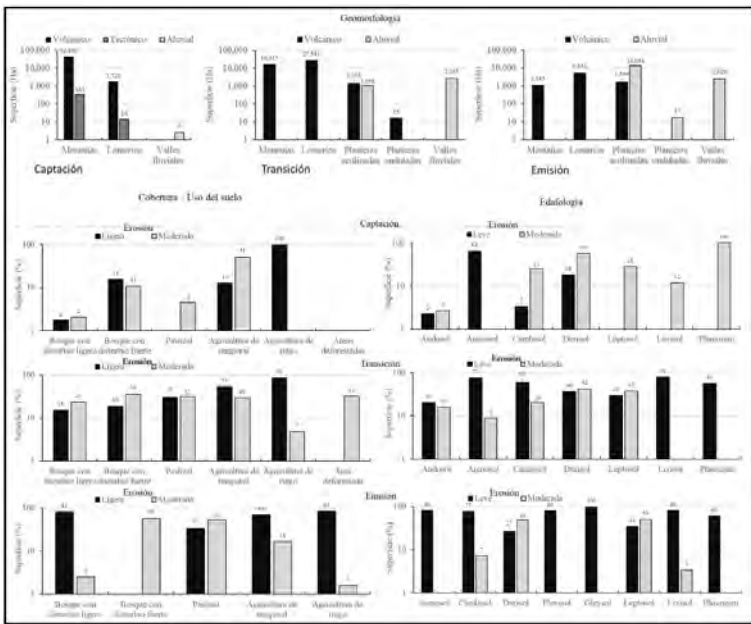
Consideraciones finales

La estructura y composición físico geográfica de la microcuenca Atoyac-Xochiac mostrada a partir de unidades de paisaje, permite tener una base cartográfica para la planificación territorial, además de servir como marco de análisis para evaluaciones ambientales con miras a lograr la sustentabilidad del sistema. Por su parte, la construcción de unidades en la escala 1:50,000, es congruente con el grado de detalle requerido en los instrumentos de planeación del espacio a nivel local como los ordenamientos territoriales.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la exactitud de los análisis obtenidos a partir de integrar cartografía de diversas fuentes, está condicionada por la ausencia o disponibilidad de información a la escala necesaria y de la misma temporalidad, lo cual no siempre se cumple. Así mismo, es deseable la conformación de equipos técnicos multidisciplinarios, enfocados en la producción y mejoramiento de la cartografía base y la resultante, mediante un intenso trabajo de campo que requiere personal especializado en esta labor. De esta manera, el trabajo acá presentado ofrece una perspectiva estructural y dinámica de la microcuenca apegada a metodologías rígidas de cartografía del paisaje y teóricamente fundamentada en la Geografía Física Compleja. No obstante, es factible reconocer posibles limitaciones en la actualidad y detalle de la información empleada, además de

concentrarse preferentemente en el análisis de procesos materiales del paisaje, que deben ser complementados con levantamientos de aspectos socioculturales y políticos que inciden en el territorio de la microcuenca.

Figura 7. Superficie abarcada por los componentes del paisaje Geomorfología (superior), cobertura / uso del suelo (inferior izquierda) y edafología o tipo de suelo (inferior derecha), dentro de cada zona funcional hídrica de la microcuenca Atoyac-Xochiac



Referencias bibliográficas

- Altieri, M. J. (2019). *Los impactos de los Procesos Urbano-Territoriales y de Gestión en la Cuenca del Alto Atoyac*. [Tesis de Doctorado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/4724>
- Arnalds, O. (2008). Andosols. En Chesworth, W. (Ed.). *Encyclopedia of Soil Science*. (Pp. 39-46). Springer Netherlands.
- Baxter, S. (2007). *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Report 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2006).
- Bocco, G., Mendoza, E., Priego, A. y Burgos, A. (2010). *La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial*. SEMARNAT-INE-CIGA, UNAM.
- Bollo-Manent, M., Hernández-Santana, J. R., Priego-Santander, A., Zaragoza-Álvarez, R., Ortiz-Rivera, A., Espinosa-Maya, A. y Ruiz-López, R. (2015). *Una propuesta de regionalización físico-geográfica de México*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.
- Bravo-Inclán, L. A., Sánchez-Chávez, J. J., Izurieta-Dávila, J. L. y Tomasini-Ortiz, A. C. (2015, octubre). Evaluación toxicológica del río Atoyac, Puebla y su relación con los parámetros fisicoquímicos. [conferencia] *2º Congreso Nacional AMICA*. Puebla, México. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/183.pdf>
- Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización*. Instituto Nacional de Ecología / Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.
- Cotler, H., Galindo, A., González, I., Pineda, R. y Ríos, E. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. SEMARNAT/ Red Mexicana de Cuencas Hidrográficas.
- Cotler, H. y Priego-Santander, A. (2004). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. En Cotler, H. (Ed.).

El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. (Pp. 63-74). SEMARNATI-INE.

- Earth Science Data Systems Program – NASA (ESDS) (2021, 1 de octubre). ASTER Global Digital Elevation Model V003. <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- Flores-Domínguez, Á. D. y Priego-Santander, A. (2019). Potencial natural para el ecoturismo costero: una perspectiva físico-geográfica. En Cruz-Angón, A. (Ed.). *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2, vol. III.* (Pp. 245-256). CONABIO.
- García, E. (1998). *Carta de climas de la República Mexicana a escala 1:1 000 000.* CONABIO.
- Garrido, A., Pérez, J. L. y Enríquez, C. (2010). Delimitación de zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. En Cotler, H. (Ed.). *Las cuencas hidrográficas de México. Diagnóstico y priorización.* (Pp. 14-17). Instituto Nacional de Ecología/Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P.
- Instituto de Geografía-Instituto Nacional de Ecología (IG-INE) (2003). *Mapa del sistema clasificatorio del relieve de México, escala 1:250,000.* Instituto de Geografía - UNAM, Instituto Nacional de Ecología - SEMARNAT.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1998). *Conjunto de datos vectoriales de geología Serie I, 1:250 000.*
- _____ (2004). *Guía para la interpretación de cartografía de edafología.* México.
- _____ (2007). *Conjunto de datos vectoriales de edafología Serie II, 1:250 000*
- _____ (2013). *Conjunto de Datos de Erosión del Suelo, Escala 1: 250 000 Serie I*
- _____ (2014). *Conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III, cartas E14B31, E14B32, E14B33, E14B41, E14B42 y E14B43.*
- _____ (2017). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1: 250 000 serie VI.*

- Mateo, J. M. (1984). *Apuntes de geografía de los paisajes*. Imprenta Andre Voisin.
- Priego-Santander, A. G. y Bocco, G. (2015). *Tres niveles de análisis en la Sierra Costa Michoacana*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM.
- Priego-Santander, A.G., Bocco, G., Mendoza, M. y Garrido, A. (2010). *Propuesta para la generación de unidades de paisajes de manera semi-automatizada. Fundamentos y método*. Serie Planeación Territorial. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, CIGA.
- Ramírez-Varela, A. y López-Santos, J.D. (2018). ¡Luchamos por un Atoyac con Vida! La lucha contra la contaminación del Río Atoyac y los daños a la salud que origina en el sur de Tlaxcala, México. *Bajo el Volcán*, 18(28), 95-108.
- Spiridonov, A. I. (1975). Some theoretical problems in geomorphology. *Soviet Geography*, 16, 395-402.
- Zaragoza-Álvarez, R., Peters-Recagno, E., Bollo-Manent, M. y Hernández-Santana, J. R. (2013). Áreas Prioritarias de Geo-conservación de la biodiversidad en la Península de Baja California, México. *Journal of Latin American Geography*, 12(3), 7-31.

**SECCIÓN II. CALIDAD DEL
AGUA, CONTAMINANTES Y
FERTILIDAD DEL SUELO**



CAPÍTULO 3. CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO ALTO ATOYAC, EN EL ESTADO DE TLAXCALA, PARA USO DOMÉSTICO Y AGRÍCOLA

Germán Santacruz de León¹

Janete Morán Ramírez²

José Alfredo Ramos Leal³

Introducción

Del agua subterránea contenida en los acuíferos depende el acceso de una parte importante de la población mundial. Existen áreas en las que por razones climáticas o geológicas es la única fuente de agua (Price, 2003). Constituye aproximadamente 3 % del total del agua dulce que circula en el planeta, valor nada despreciable si se considera que el agua de ríos y lagos comprende 1/50 del 1 % del agua total (Price, 2003). Actualmente, el 50 % del suministro de agua potable depende del agua subterránea (Rifat et al. 2014), también se emplea para el riego de productos agrícolas. En las zonas áridas y semiáridas de América Latina, los acuíferos son la fuente de un tercio del total de agua utilizada (Miletto et al., 2006). En México el agua subterránea, es la principal fuente de abasto para diversos usos.

¹ Profesor-Investigador del Programa “Agua y Sociedad” de El Colegio de San Luis, A.C., correo-e: german.santacruz@colsan.edu.mx

² Investigadora Cátedra CONACYT adscrita a la UNAM., correo-e: janete@igeofisica.unam.mx

³ Profesor-Investigador de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica., correo-e: jalfredo@ipiciyt.edu.mx

El conocimiento de la disponibilidad del agua, no solo en términos de su cantidad, si no cada vez más de su calidad, en el tiempo y el espacio, es muy importante porque permite diferenciar zonas y, en función de dicha composición, destinarla al mejor uso posible o definir el tratamiento que requiere para que cumpla la calidad necesaria para un determinado uso. Lo que se suma al incremento de los estándares de vida (Wijnen et al., 2012) que demandan mejores productos agropecuarios.

Cada vez más se está poniendo atención al monitoreo y al análisis de la calidad del agua para uso doméstico, sobre todo en los países en desarrollo. Se han generado diferentes técnicas para reportar su calidad, entre ellos los llamados Índices de Calidad del Agua (ICA) los cuales agrupan uno o varios parámetros físico-químicos o bacteriológicos (Guzmán-Colis et al., 2011; Kankal et al., 2012), incluso con el soporte de técnicas estadísticas (Hafizan et al., 2011; Hülya y Hayal, 2007; Mohd et al., 2011; Papaioannou et al., 2010).

Para el caso de México, a partir del año 2002, el ICA determinado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) solo considera la materia orgánica medida como DBO o DQO, pero no considera la presencia de contaminación química y biológica. De manera que ese valor numérico integra diversos parámetros, lo cual se convierte o suele convertirse en una desventaja, sobre todo a los ojos de la opinión pública. Del mismo modo, el conocimiento de la calidad del agua para fines de uso agrícola es de suma importancia, aunque en México no existen parámetros normados, existen criterios que sirven como apoyo para la clasificación de agua de riego.

De manera que en pocas regiones de México se conoce la calidad del agua subterránea suministrada a la población y al sector agropecuario. El interés se ha centrado en localizar pozos con buenos rendimientos y la calidad del agua extraída se considera como un requisito de menor relevancia (Cardona et al., 2010).

De acuerdo con lo anterior, se consideró relevante determinar y analizar la calidad de agua subterránea del acuífero Alto Atoyac para uso doméstico y agrícola, a partir de la aplicación de diversos índices. Para ello se obtuvo la información generada

y compilada por la CONAGUA (<https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>) en la Red Nacional de medición de la Calidad del Agua y se seleccionó de manera específica la generada para el acuífero “Alto Atoyac”. Con esa información se determinó el ICA y el ICOM (Brown et al., 1970; Backman et al., 1998), los cuales serán desarrollados más adelante.

Por otro lado, la clasificación del agua para riego se realizó considerando las condiciones de acidez y alcalinidad (pH), en segunda instancia se consideraron los índices de sodicidad como la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), el Carbonato de Sodio Residual (CSR), el porcentaje de sodio soluble (PSS), el porcentaje de sodio (%Na), la Relación de Kelly y el Índice de Permeabilidad (IP) (Eaton, 1950; Todd, 1980). Para evaluar y clasificar el agua con respecto a las condiciones de salinidad se consideró a la Conductividad Eléctrica (CE), la Salinidad Efectiva (SE) y el Potencial Osmótico que está íntimamente relacionado con la CE y con los Sólidos Disueltos Totales (Aguilera y Martínez, 1996; Palacios y Aceves, 1970; Porta, 2010), la conjunción de estos últimos tres valores permite clasificar el agua de riego. De igual forma se clasificó el agua considerando la combinación de efectos de sodicidad y salinidad con el empleo del diagrama del Departamento de Salinidad de Estados Unidos y el Diagrama de Wilcox. Todos los índices se calcularon en una hoja Excel mediante la aplicación de ecuaciones estándar.

El capítulo se divide en tres apartados, en el primero denominado *Localización y caracterización del acuífero Alto Atoyac*, se hace la descripción de las condiciones biogeográficas e hidrogeológicas; así como los volúmenes de agua empleados en el sector doméstico y agrícola. En el segundo, denominado *Clasificación del agua en relación con el uso doméstico*, se analizan los resultados del Índice de Calidad del Agua y se comparan con los valores límites máximos permisibles establecidos en la normatividad mexicana (NOM-127-1994-SSA). En el tercero, denominado *Clasificación del agua en relación con el uso agrícola*, se concentran y analizan los resultados obtenidos de los diversos índices y se comparan con valores guías establecidos en diversas publicaciones. Al final se plantean algunas reflexiones finales.

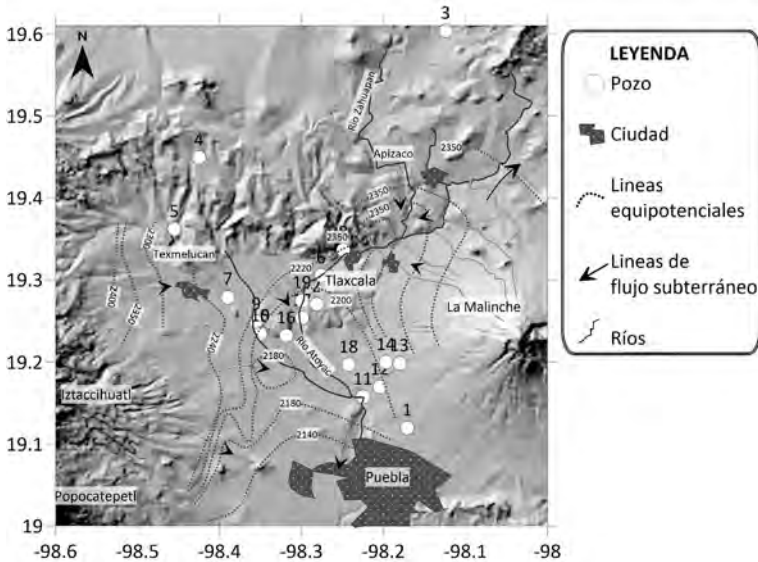
Localización, caracterización del acuífero Alto Atoyac y usos del agua

El acuífero Alto Atoyac, es uno de los cuatro acuíferos administrativos en los que la CONAGUA divide al estado de Tlaxcala. Abarca una superficie de 2,032 km² (ver Figura 1) en el 95 % de esa superficie predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, con precipitaciones del orden de los 1,150 mm (CONAGUA, 2020; Flores-Márquez et al. 2006). Es clasificado como un acuífero libre.

El área de estudio se ubica en el Eje Neovolcanico Transmexicano, debido a esto las principales unidades geológicas que afloran en la región son de rocas volcánicas de diferente composición: riolitas, andesitas, basaltos, tobas y brechas volcánicas; así como, diversas asociaciones de ellas; además, se tienen sedimentos lacustres y brechas sedimentarias.

En la cuenca del Atoyac, se observa un parte-aguas en las cercanías de Apizaco, hacia la parte noreste del área, el flujo subterráneo va en dirección SW-NE; mientras que hacia el valle de Puebla los flujos subterráneos convergen hacia al río Atoyac (ver Figura 1). Las zonas de descarga principales corresponden a las sierras y montañas de mayor elevación como la sierra ubicada al norte de la ciudad, La Malinche, Sierra Nevada que comprende El Popocatepetl e Iztaccihuatl. La descarga del sistema se localiza al sur del valle de Puebla, hacia la Presa de Valsequillo.

**Figura 1. Localización de la red de monitoreo de la
CONAGUA en el acuífero Alto Atoyac**



Fuente: elaboración propia.

Los datos más recientes del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la CONAGUA, muestran que existen 525 títulos de concesión que en conjunto suman un volumen de agua extraída de 130.79 Millones de metros cúbicos por año ($Mm^3/año$); sin embargo, la CONAGUA estimó en el 2018 que se bombeaban $153.4 Mm^3/año$, aunque, por otro lado, indica que el volumen de extracción de agua de este acuífero es de $142 Mm^3/año$ e indica, después de hacer el balance hidrológico, que existe una disponibilidad de $29.3 Mm^3/año$ (CONAGUA, 2020).

Del volumen de agua registrado en el REPGA, el sector industrial extrae $13.7 Mm^3/año$, de este último una sola empresa, de ramo refresquero, explota 13 %. Por otro lado, el uso público urbano, en conjunto con el clasificado como doméstico, extrae $71.2 Mm^3/año$, de los cuales 11.22% le corresponde a la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del municipio de Tlaxcala. El volumen destinado al uso agrícola asciende a $42.5 Mm^3/año$, distribuido en 212 títulos de concesión, de los cuales $0.8 Mm^3/año$

año (que es el máximo asignado) corresponde a una unidad de riego para el desarrollo rural.

Los datos anteriores muestran que para uso público urbano y para el uso agrícola, se destinaban 54.40% y 32.45%, respectivamente. Esos valores muestran la importancia de los volúmenes de agua extraídos del acuífero para esos respectivos usos, pero también muestran la importancia de conocer la calidad del agua.

Clasificación del agua en relación con el uso doméstico

La CONAGUA opera la Red Nacional de medición de la Calidad del Agua, de la cual se seleccionó de manera específica la generada para el acuífero “Alto Atoyac” (<https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>). En este acuífero la CONAGUA cuenta con 19 puntos de monitoreo (ver Figura 1 y Tabla 1), en los que ha determinado en diferentes fechas la calidad del agua. En este apartado se comparan esos los resultados con la normatividad vigente en México para uso doméstico.

Tabla 1. Clave y nombre de los sitios de monitoreo de la calidad del agua

Número (figura 1)	Clave sitio	Nombre del sitio
1	DLTLA2542	San Pablo del Monte (centro)
2	DLTLA2553	Cuamilpa
3	DLTLA2573	Tlaxco I
4	DLTLA2574	Españita - El Carmen
5	DLTLA2575	Espíritu Santo
6	DLTLA5342	La Virgen
7	DLTLA5343	Guadalupe Victoria
8	DLTLA5345	Quiahuixtlan
9	DLTLA6374	Pozo San José Atoyatenco
10	DLTLA6375	Pozo San Miguel Xochitecatitla
11	DLTLA6376	Pozo Buenaventura
12	DLTLA6377	Pozo 1 Potrero
13	DLTLA6378	Pozo 2 San Marcos Contla
14	DLTLA6379	Pozo 1 San Marcos Contla

Calidad del agua del acuífero Alto Atoyac, en el estado de Tlaxcala,
para uso doméstico y agrícola

15	DLTLA6380	Pozo 6 Ixtacuixtla. San Miguel La Presa
16	DLTLA6381	Pozo Nativitas
17	DLTLA6382	Pozo San Bartolome Tenango
18	DLTLA6383	Pozo 2 Zacatelco. Barranca Sánchez
19	DLTLA6435	Pozo San Vicente Xiloxoxitla

Fuente: elaboración propia, con base en la CONAGUA (2020).

El índice de Calidad del Agua (ICA) se determinó con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico en relación con su concentración (Brown et al., 1970) considerando la siguiente expresión:

$$ICA = K \frac{\sum_{t=1}^n C_t P_t}{\sum_{t=1}^n P_t}$$

Donde:

K es la constante que se asigna de acuerdo a las características físicas del agua (ver Tabla 2).

P_t son los pesos específicos asignados a cada parámetro (t), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a 1.

C_t es la calidad del parámetro (t) en función de su concentración, cuyo valor oscila entre 0 y 100. A partir de este y en función del uso del agua, es posible estimar el nivel de contaminación (ver Tabla 3).

Tabla 2. Clasificación de la constante K en relación a las características físicas y organolépticas del agua

Peso	Características del agua
1.0	Para aguas claras sin aparente contaminación
0.75	Para agua con ligeros color, espuma, turbidez aparente no natural
0.50	Para agua con apariencia de estar fuertemente contaminada y fuerte olor
0.25	Para aguas negras que presenten fermentación y olores.

Fuente: Brown et al. (1970).

Tabla 3. Clasificación del índice de calidad del agua subterránea

Nivel	Escala de ICA	Uso	Código de Color
90-100	Excelente	No requiere purificación para su consumo	Azul
71-90	Aceptable	Requiere purificación menor	Verde
51-70	Levemente Contaminada	Dudoso su consumo sin purificación	Amarillo
26-50	Contaminada	Tratamiento de potabilización indispensable	Naranja
0-25	Fuertemente contaminada	No apta para consumo humano	Rojo

Fuente: Brown et al. (1970).

El Índice de Contaminación (ICON) es otra forma de evaluar la contaminación del agua subterránea, el cual está representando la suma de factores que se encuentra excedidos según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-1994 o la Environmental Protection Agency (EPA), con este índice es fácil ubicar los sitios que rebasan los límites de elementos y especies iónicas dañinas para la salud humana (Backman et al., 1998). Con la ecuación la siguiente ecuación:

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ni}}{C_{Ai}} - 1$$

C_d = Índice de contaminación (ver Tabla 5)

C_n = factor de contaminación para el i-ésimo componente (parámetro utilizado por cada muestra).

C_{Ai} = valor analítico del i-ésimo componente (Componentes químicos del agua subterránea).

C_{ni} = Concentración superior permisible del i-ésimo componente (N significa valor normativo basado en la NOM-127-SSA1-1994 para cada componente químico utilizado).

Los índices del ICON pueden ser positivos o negativos de acuerdo a su concentración química, los valores negativos indican que no se ha rebasado los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, se encuentran principalmente en zonas sin contaminación; mientras que los valores positivos se asocian con parámetros que han rebasado los límites de referencia y apuntan problemas de contaminación (ver Tabla 4).

Tabla 4. Valores indicativos de ICON

Contaminación	Rango ICON
Baja	≤ 1
Media	1-3
Alta	≥ 3

Fuente: elaboración propia, con base en Backman et al. (1998).

Para la obtención de los Índices ICA e ICON se utilizaron datos de iones mayoritarios (Ca^{++} , K^{+} , Mg^{++} , Na^{+} , NO_3^{-} , SO_4^{-} , Cl), parámetros fisicoquímicos (pH, CE, STD) y elementos traza (As, Ba, F). El ICA para todos los aprovechamientos se encuentra, en general, entre valores superiores a 80% (ver Tabla 5), es decir agua clasificada como de aceptable a excelente para el consumo humano. Lo mismo ocurre para el ICON, los aprovechamientos muestreados por CONAGUA, de acuerdo con ese índice, presentan niveles bajos de contaminación.

Sin embargo, esos índices, como ya se señaló, solo consideran parámetros fisicoquímicos y iones mayoritarios, de manera que puede verse que en todos los pozos y en todas las muestras analizadas, en mayor o menor medida, están presentes organismos coliformes fecales y la NOM-127-1994-SSA marca como límite permisible No detectable NMP/100 ml, de manera que el agua extraída de esos pozos no debe ser consumida de manera directa, debe ser tratada antes de su consumo. Por otro lado, la presencia de esos organismos es indicador de contaminación antropogénica del agua subterránea, lo cual es evidente si se considera que el Alto Atoyac es un acuífero libre.

Por otro lado, los datos muestran que existen pozos a los que se les debería mantener en vigilancia permanente. Así los pozos DLTLA5345 y DLTLA2575 deben estar siendo

monitoreados en relación con la presencia de Dureza en el agua, en ambos se presentan valores superiores a los establecidos en la normatividad mexicana, la dureza en el agua de consumo humano puede modificar el sabor del agua, reseca ligeramente la piel y el cabello, puede generar la acumulación de calcio y precipitación en electrodomésticos y tuberías (incrustación) de igual manera un agua blanda favorece la corrosión de tuberías (Julián-Soto, 2010).

En condición similar de vigilancia permanente deben estar los pozos DLTLA2542, DLTLA2553 y DLTLA5342, en relación con la presencia de hierro en el agua, en los tres se tienen muestras que rebasan los valores límites permisibles. La presencia de este metal en el agua de consumo humano puede generar olor, color y sabor desagradable en el agua, además de teñir utensilios de porcelana, ropa, accesorios de plomería y concreto; así como, acumulación en tuberías, lo que causa problemas para el suministro del agua. Este mineral puede estar asociado con consorcios de bacterias, cabe mencionar que no causa daño a la salud, pero le otorga características no deseadas en el agua (Vega et al., 2017).

Tabla 5. Valores del ICA e ICON y los parámetros indicados (en mg/l) considerados en la normatividad ambiental oficial mexicana

Pozo		ICA	ICON	Organismos coliformes fecales	Dureza total (como CaCO ₃)	Hierro	Fluoruros (como F ⁻)
				No detectable NMP/100 ml*	500*	0.3*	1.5*
DLTLA2542	Máximo	100.00	-5.96	40	160.00	0.47	0.38
	Mínimo	86.59	-7.34	4	90.00	0.00	0.04
	Promedio	94.77	-6.84	24	132.82	0.11	0.15
DLTLA2553	Máximo	100.00	-5.46	30	214.00	0.69	3.95
	Mínimo	78.94	-6.23	21	136.00	0.00	0.04
	Promedio	95.92	-5.96	25	163.07	0.10	0.69
DLTLA2573	Máximo	100.00	-5.99	90	106.31	0.10	3.97
	Mínimo	77.28	-7.69	30	73.75	0.00	0.04
	Promedio	95.56	-6.58	60	86.71	0.05	0.75
DLTLA2574	Máximo	100.00	0.26	4	154.44	0.07	1.80
	Mínimo	84.33	-7.12	4	108.00	0.00	0.04
	Promedio	95.88	-5.92	4	125.28	0.04	0.41
DLTLA2575	Máximo	100.00	-0.54	0	522.72	0.16	3.49
	Mínimo	66.05	-5.56	0	464.00	0.00	0.04
	Promedio	88.38	-2.13	0	487.26	0.05	0.52
DLTLA5342	Máximo	83.43	-3.11	430	396.00	3.75	0.63
	Mínimo	76.32	-4.06	430	316.00	1.19	0.36
	Promedio	79.53	-3.55	430	354.00	2.98	0.46
DLTLA5343	Máximo	92.72	-4.47	0	300.29	0.20	0.49
	Mínimo	81.16	-5.83	0	218.00	0.01	0.32
	Promedio	86.79	-5.26	0	241.38	0.08	0.40
DLTLA5345	Máximo	87.57	0.17	40	622.00	0.06	0.68
	Mínimo	77.36	-2.91	40	528.00	0.00	0.04
	Promedio	80.66	-0.99	40	560.55	0.04	0.28

*Valores máximos permisibles establecidos en la NOM-127-1994-SSA.

Fuente: elaboración propia, con base en CONAGUA (2020).

Si la presencia de dureza y hierro por arriba de los valores guía establece restricciones para el consumo del agua que los contiene, la presencia de Fluoruros suele restringir más su consumo de manera directa, así, el agua de los pozos DLTLA2553, DLTLA2573, DLTLA2574 y DLTLA2575 que presentan valores por arriba del valor normado debe ser sometida a un tratamiento previo antes de su ingesta, el flúor a valores superiores a 1.5 mg/l en agua provoca una enfermedad ósea por el reemplazamiento del Ca^{2+} por F^- , esta condición es conocida como fluorosis esquelética, al endurecerse y perder la elasticidad los huesos aumentado el riesgo de sufrir fracturas, la ingesta prolongada puede dañar el sistema nervioso central (Valdez-Jiménez et al., 2011).

Clasificación del agua en relación con el uso agrícola

Las 88 muestras colectadas y analizadas por la CONAGUA cumplen la condición de electroneutralidad necesaria para proceder al análisis de las características químicas del agua y los efectos de éstas en relación con la productividad agrícola bajo riego. La calidad del agua depende de la presencia de sales disueltas y sus concentraciones. Las sales modifican los procesos osmóticos y la presencia de sustancias tóxicas (como el boro) pueden afectar los procesos metabólicos en las plantas. De manera que la sodicidad, la salinidad y la toxicidad de iones específicos se consideran para evaluar la calidad del agua.

Los pozos del DLTLA6374 al DLTLA6383; así como, el DLTLA6435 solo han sido muestreados dos veces, cada muestra correspondiente al año 2019 y 2020. Los otros 8 pozos han sido muestreados, en el período 2013-2020, entre 5 y 9 veces, por lo que, en este caso se pueden obtener valores promedios, máximos y mínimos de los índices empleados para la clasificación del agua con fines de riego agrícola.

Condiciones de acidez y sodicidad

Los valores máximo y mínimo de pH muestran que ninguno de los sitios muestreados presenta valores de pH por arriba de 8.5 y

todas se encuentran por arriba de 6 (ver Tabla 6). Valores de pH superiores a 8.5 e inferiores de 6 son indicadores de una calidad anormal del agua, son señal de la presencia de algún ion tóxico para los cultivos. Agua con valores de pH dentro del intervalo 6-8.5 provocan mejores posibilidades de asimilar diferentes nutrientes como el fósforo y algunos micronutrientes.

La presencia de sodio en el agua a concentraciones considerables puede afectar a la permeabilidad, la tasa de infiltración y la labranza de los suelos (Romero, 2009), de manera que una proporción alta de sodio con respecto a la concentración de calcio provoca descenso en la infiltración por su efecto dispersante sobre los agregados del suelo (Grattan y Oster, 2003; Ruda, 2005). Los índices que permiten evaluar la calidad del agua con respecto al sodio son el RAS, el CSR, el porcentaje de sodio soluble (PSS), el porcentaje de sodio (%Na), la Relación de Kelly (Tabla 6). Si la proporción de sodio es alta con respecto a la presencia de calcio y magnesio, será mayor el peligro de sodificación (Peinado-Guevara *et al.*, 2011).

Tabla 6. Valores de los índices indicados en los pozos con cinco a nueve muestras

Pozo		pH	RAS	RAM	PSS	% Na	RK	CSR
DLTLA2542	Máximo	7.59	0.66	47.11	24.13	28.14	0.32	-0.60
	Mínimo	6.30	0.01	36.94	0.58	5.02	0.01	-1.92
	Promedio	7.13	0.42	42.99	15.38	18.65	0.19	-1.35
DLTLA2553	Máximo	7.86	1.44	56.22	36.81	38.67	0.58	0.91
	Mínimo	6.40	0.56	34.72	17.39	6.62	0.21	-1.13
	Promedio	7.34	0.76	45.69	22.40	24.13	0.30	-0.18
DLTLA2573	Máximo	8.10	1.41	57.86	44.34	49.56	0.80	1.18
	Mínimo	6.80	0.02	31.80	1.34	9.20	0.01	-1.10
	Promedio	7.32	1.11	48.44	35.91	41.60	0.60	0.48
DLTLA2574	Máximo	7.43	0.97	57.29	30.70	33.84	0.44	8.60
	Mínimo	6.70	0.75	44.86	25.37	29.23	0.34	-0.24
	Promedio	7.18	0.88	48.52	28.19	32.00	0.39	0.96
DLTLA2575	Máximo	7.39	1.36	55.52	100.00	100.00	0.43	11.15
	Mínimo	6.40	1.04	37.02	18.11	21.35	0.22	-1.41
	Promedio	6.82	1.14	52.09	29.69	32.50	0.28	2.22
DLTLA5342	Máximo	7.70	1.46	41.46	28.27	29.98	0.39	-0.75
	Mínimo	6.70	1.27	37.44	25.96	27.72	0.35	-2.18
	Promedio	7.16	1.33	39.32	26.94	28.71	0.37	-1.17
DLTLA5343	Máximo	7.70	0.89	62.24	22.42	24.02	0.29	-1.94
	Mínimo	6.70	0.71	58.71	19.88	21.49	0.25	-3.67
	Promedio	7.32	0.81	61.20	21.29	23.00	0.27	-2.52
DLTLA5345	Máximo	7.90	0.96	32.89	17.25	20.85	0.21	0.75
	Mínimo	6.80	0.76	28.28	13.47	15.93	0.16	-4.31
	Promedio	7.18	0.86	29.97	15.14	17.93	0.18	-1.59

Fuente: elaboración propia, con base en CONAGUA (2020).

Los valores máximos y mínimos de RAS muestran que no existe peligro de sodicidad en el agua extraída del acuífero Alto Atoyac. Todas las muestras son clasificadas como S1, es decir presentan un riesgo de sodificación bajo. Por otro lado, cuando la presencia de carbonatos y bicarbonatos es superior a la

concentración de calcio más magnesio, existe la posibilidad de que se formen carbonatos de sodio, provocando la defloculación del suelo (Aguilera y Martínez, 1996; Palacios y Aceves, 1970), las superficies agrícolas irrigadas con este tipo de agua pueden volverlas infértiles (Rifat et al. 2014). El CSR indica la peligrosidad del carbonato de sodio, cuando ya han reaccionado los cationes calcio y magnesio con los carbonatos y bicarbonatos, se usa para predecir la tendencia de que esos cationes se precipiten en el suelo cuando se riegan con aguas altamente carbonatadas (Martínez y Juan, s.f.). Los pozos DLTLA2574 y DLTLA2575 presentan valores de CSR muy superiores a 1.25 meq/L, el resto presenta valores menores a ese límite y se consideran seguras para su uso en riego agrícola.

El desplazamiento del calcio y el magnesio, en el proceso de intercambio catiónico, inicia cuando el contenido de sodio en solución es mayor al 50% de los cationes (Aguilera y Martínez, 1996; Palacios y Aceves, 1970), altos porcentajes de sodio en agua (mayores a 50%) usadas en la irrigación, impiden el crecimiento de los cultivos y reducen la permeabilidad del suelo (Rifat et al., 2014), valores de PSS inferiores a 50 indican aguas de buena calidad y los superiores a ese valor indican que el agua no es apta para riego, en este caso solo el pozo DLTLA2575 presenta un valor máximo superior al valor guía, pero el promedio es inferior a 50.

Las aguas subterráneas pueden ser agrupadas de acuerdo con su contenido de sodio en por ciento (%Na), se consideran excelentes para su uso en riego agrícola cuando presentan valores menores a 20%, buena con valores de 20-40%, admisible con valores de 40-60%, dudoso de 60-80% y no adecuadas cuando presenta valores superiores a 80 % (Wilcox, 1955). Solo el pozo DLTLA2575 presenta un valor máximo de 100, es decir, agua no adecuada para su uso en riego agrícola, pero su valor mínimo y valor medio (ver Tabla 3) muestran que, en general presenta valores menores a 40%, es decir que es un agua de buena calidad para su uso en la agricultura.

La tasa o índice de Kelly (RK) mide la presencia de sodio con respecto a la concentración de calcio más magnesio, valores de más de 1 indican exceso de sodio en el agua, por lo tanto,

valores menores de 1 indican que el agua es adecuada para su uso en riego agrícola (Aher y Deshpande, 2011; Deshpande y Aher, 2011, 2012). Ninguno de los pozos muestreados por CONAGUA y aquí analizados presentan valores superiores a 1 (ver Tabla 3).

En la mayoría de las aguas, el calcio y el magnesio permanecen en equilibrio, sin embargo, la presencia de mayores concentraciones de magnesio afecta la producción agrícola en cultivos sensibles a este componente químico (Nagaraju et al. 2006). En general las aguas subterráneas contienen concentraciones bajas de magnesio, éstas pueden ser mayores si el agua se encuentra en contacto con dolomitas que contengan altas concentraciones de este magnesio, su contenido en el agua es un indicador relevante para la clasificación del agua para su uso en riego, el índice que permite evaluarlo es la Relación de Adsorción de Magnesio (RAM) que proporciona valores porcentuales, valores superiores a 50% provoca efectos perjudiciales en el suelo (Nag y Ghosh, 2013; Obiefuna y Sheriff, 2011; Rifaf et al. 2014). En general se presentan valores máximos superiores a 50%, incluso los promedios alcanzan a superar ese valor guía, es decir se puede señalar que existe una mayor presencia de magnesio en el agua que dependiendo de su uso podría estar provocando efectos dañinos en el suelo agrícola.

Los otros pozos muestreados (DLTLA6374 al DLTLA6383, y el DLTLA6435) presentan condiciones de acidez y sodicidad adecuadas en el agua para su uso en riego agrícola.

Condiciones de salinidad

La presencia de sales a altas concentraciones en el agua de riego puede provocar mayor presencia de sales en la zona radicular y acumulación de las mismas en el perfil del suelo, generando reducción en el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos agrícolas (Grattan y Oster 2003; Khan, Malik y Nehra, 2021; Romero, 2009). La presencia de sales afecta el potencial osmótico y disminuye el rendimiento de los cultivos (Martínez y Juan, s.f.), esa presencia se evalúa midiendo la conductividad eléctrica (CE), la cual es directamente proporcional a la concentración de sales en solución (Martínez y Juan, s.f.). Otros

criterios que permiten evaluar las condiciones de salinidad en el agua son la Salinidad Efectiva (SE) (Aguilera y Martínez, 1996; Palacios y Aceves, 1970; Porta, 2010) y el Potencial Osmótico que está íntimamente relacionado con la CE y con los SDT, la conjunción de estos últimos tres valores permite clasificar el agua de riego (Martínez y Juan, s.f.).

La salinidad se considera como el criterio más importante para clasificar al agua de riego (Ghassem et al. 1995), su presencia en exceso en los suelos provoca reducción de la productividad (Essien y Ubit, 2013). La conductividad eléctrica es una medida del riesgo de salinidad, el exceso de ésta reduce la actividad osmótica e interfiere en la absorción de agua y nutrientes del suelo a la planta, de manera que a mayor CE menos agua disponible para las plantas (Ishaku et al., 2011; Joshi et al., 2009; Nag y Ghosh, 2013; Nagaraju et al., 2006; Obiefuna y Sheriff, 2011). Valores de CE menores de 250 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C en el agua de riego se consideran excelentes (C1), de 250-750 son clasificadas como buenas (C2), de 750-2000 (C3) son admisibles, de 2000-3000 (C4) se considera que debe dudarse su uso, así que agua con valores superiores a 3000 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C (C5) se consideran inadecuadas, toda vez que la salinidad del suelo tiende a incrementarse en forma proporcional a la concentración de sales en el agua con la que se riega (Hamdy et al., 1993; Sharma y Rao, 1998; Pérez, Martínez y Sánchez, 2003). La concentración de sales en el suelo puede ser de dos a seis veces la que corresponde a la conductividad del agua de riego (Hamdy et al., 1993; Pérez, Martínez y Sánchez, 2003).

Los valores máximos y mínimos de CE (ver Tabla 7) muestran que el agua de los pozos muestreados está clasificada como buena, aunque también se presentan valores entre 750-2000 lo que indica que es agua subterránea admisible para el riego agrícola, en general los resultados muestran que los aprovechamientos muestreados presentan peligro de media a alto de salinidad. Del mismo modo, deberá ponerse especial atención a los pozos DLTLA2574, DLTLA2575, DLTLA5342 y DLTLA5345

En relación con la SE los pozos DLTLA2575, DLTLA5342, DLTLA5343 y DLTLA5345 presentan, en general, agua como

condicionada, con valores de SE superiores a 3 pero inferiores a 15 (ver Tabla 7 y Figura 2). En esta misma condición, en general, se encuentran los pozos DLTLA6382, DLTLA6383 y DLTLA6435 para el muestreo de 2020. Se considera que la Salinidad Efectiva (SE) estima de manera más real el peligro de salinización toda vez que considera las sales solubles del agua de riego que pasan a formar parte del agua del suelo, toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles como son los carbonatos de calcio y magnesio, así como, los sulfatos de calcio (Barrios, 2014; Mancilla, 2012; Rodríguez et al. 2008). Para el caso de la Salinidad Potencial (SP), el agua es clasificada mayoritariamente como buena.

Tabla 7. Valores de los índices indicados en los pozos con 5 a 9 muestras

Pozo		CE ($\mu\text{mhos/cm}$)	SDT (mg/l)	PO	SE
DLTLA2542	Máximo	505.00	388.00	0.40	2.94
	Mínimo	234.00	153.60	0.19	1.16
	Promedio	330.33	292.67	0.26	1.92
DLTLA2553	Máximo	554.00	354.56	0.44	2.07
	Mínimo	342.00	250.00	0.27	1.02
	Promedio	408.60	280.79	0.33	1.45
DLTLA2573	Máximo	341.00	252.00	0.27	1.75
	Mínimo	233.00	149.12	0.19	1.21
	Promedio	284.20	216.43	0.23	1.40
DLTLA2574	Máximo	2996.00*	277.00	2.40	1.59
	Mínimo	252.00	205.44	0.20	1.06
	Promedio	583.33	244.50	0.47	1.23
DLTLA2575	Máximo	1346.00	716.00	1.08	4.59
	Mínimo	561.00	659.00	0.45	1.12
	Promedio	1019.70	687.14	0.82	3.02
DLTLA5342	Máximo	1033.00	636.25	0.83	5.10
	Mínimo	655.00	541.00	0.52	3.20
	Promedio	848.20	592.05	0.68	3.79

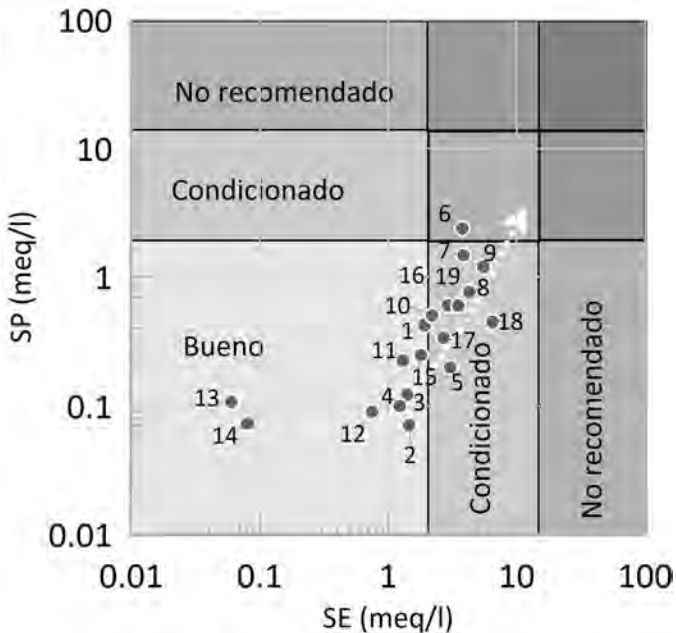
Calidad del agua del acuífero Alto Atoyac, en el estado de Tlaxcala,
para uso doméstico y agrícola

DLTLA5343	Máximo	681.00	496.00	0.54	5.28
	Mínimo	402.00	392.00	0.32	3.18
	Promedio	528.22	443.83	0.42	3.84
DLTLA5345	Máximo	1284.00	828.00	1.03	6.91
	Mínimo	584.00	646.00	0.47	2.43
	Promedio	1097.00	771.83	0.88	4.29

* Valor sujeto a verificación.

Fuente: elaboración propia, con base en CONAGUA (2020).

Figura 2. Valores de Salinidad Efectiva (SE) versus Salinidad Potencial (SP) de los valores promedio de calidad del agua



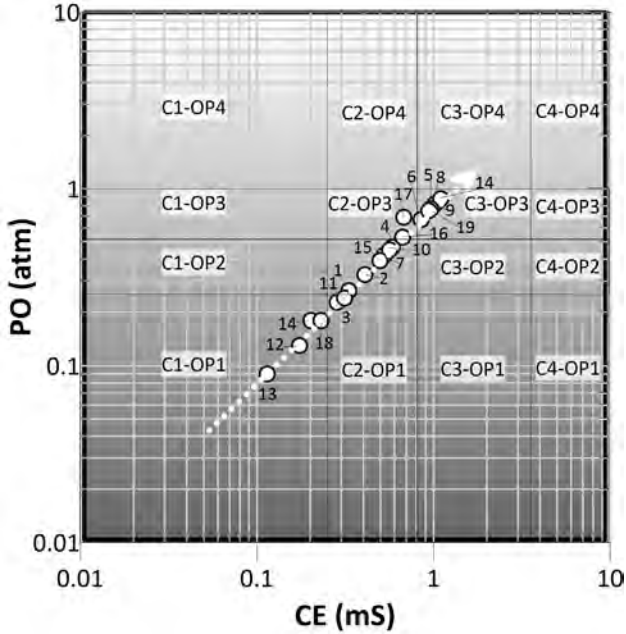
Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los SDT, si los valores de estos están entre 0-1000 mg/l se considera un agua dulce no salina, si están entre 1000-3000 mg/l ligeramente salina, de 3000-10000 se considera moderadamente salina, valores de SDT superiores a

10000 mg/l son indicadores de aguas muy salinas. En general, los aprovechamientos muestreados presentan agua dulce no salina, pero los pozos DLTLA2575, DLTLA5342, DLTLA5343 y DLTLA5345, presentan condiciones de agua ligeramente salina. Es importante recordar que la presencia de iones disueltos en el agua en cantidades excesivas provoca efectos físicos y químicos en el suelo y las plantas (Ahamed et al., 2013), reduce la capacidad de las raíces de las plantas a extraer agua del suelo. Existe una relación directa entre la presencia de sales, medidas a partir de la CE y el PO.

Considerando lo anterior, se estimó conveniente clasificar el agua de acuerdo con su Potencial Osmótico (PO) y la presencia de SDT. Valores de PO inferiores a 0.1 atm son indicadores de agua poco salina y de excelente calidad, valores entre 0.1-0.3 son indicadores de agua salina de calidad buena, entre 0.3-0.7 indican agua salina de calidad permisible, entre 0.7-1.10 señalan agua muy salina con problemas crecientes y valores de PO superiores a 1.10 atm son indicadores de agua muy salina con problemas importantes. Los resultados de este índice muestran que la mayoría de los aprovechamientos muestreados presentan agua salina de calidad permisible a agua muy salina con problemas crecientes (ver Figura 3).

Figura 3. Valores de Conductividad Eléctrica (CE) versus Potencial Osmótico (PO) de los valores promedio de calidad del agua

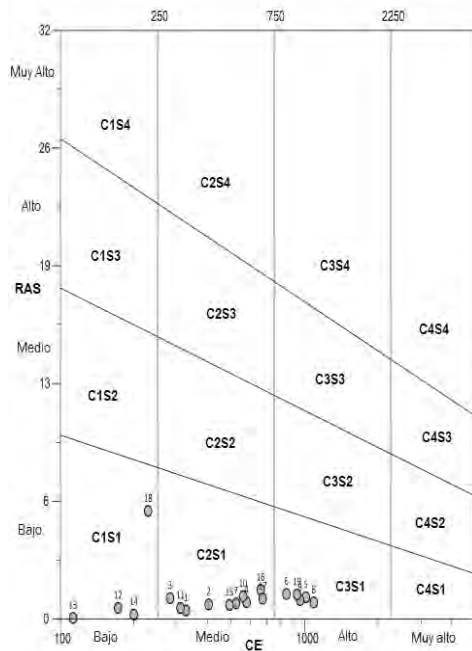


Fuente: elaboración propia.

Clasificación del agua considerando el % Na, la RAS y la CE

La combinación de los valores de RAS y CE para cada uno de los puntos de muestreo, fueron graficados en el diagrama desarrollado por el Laboratorio de Salinidad de Estados Unidos (ver Figura 4), ese gráfico permite la clasificación del agua de riego. De los valores promedio de las muestras colectadas, cuatro presentan agua clasificada como C1S1, es decir peligro bajo de salinidad y bajo peligro de sodificación, diez caen en la clasificación C2S1, así que presentan peligro medio de salinidad y bajo peligro de sodificación. Los cinco restantes (puntos 5, 6, 8, 9 y 19) presentan alto nivel de salinidad, pero bajo peligro de sodicidad.

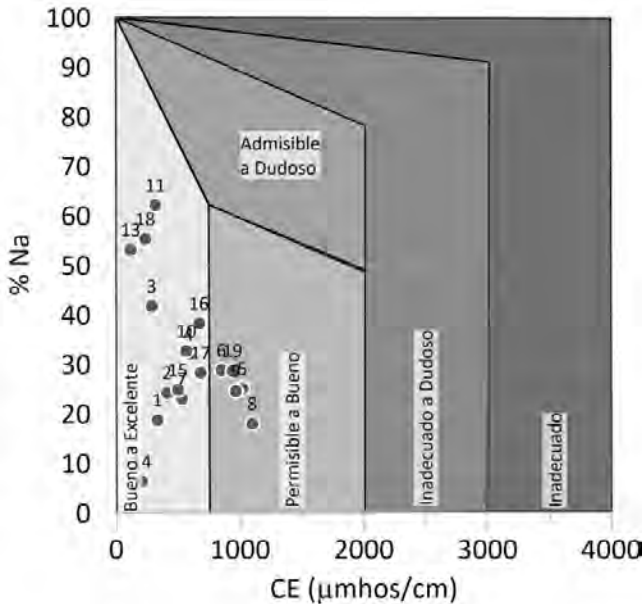
Figura 4. Clasificación del agua de acuerdo a la CE vs RAS, para los valores promedio del acuífero Alto Atoyac



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de sodio (% Na) se grafica de manera conjunta con la CE en el diagrama de Wilcox y éste permite clasificar el agua para su uso en riego agrícola. Catorce de los aprovechamientos muestreados caen en la clasificación de agua buena a excelente. El resto de los aprovechamientos (puntos 5, 6, 8, 9 y 19) caen en la condición de agua considerada de permisible a buena (ver Figura 5). Es conveniente recordar que no existen estudios antecedentes sobre la calidad del agua que sirvan como referencia.

Figura 5. Clasificación del agua de acuerdo a la Conductividad eléctrica vs %Na, para los valores promedio del acuífero Alto Atoyac



Fuente: elaboración propia.

El uso del agua del acuífero Alto Atoyac está condicionado por los niveles de salinidad, principalmente en el área de influencia de los pozos DLTLA2575 (5), DLTLA5342 (6), DLTLA5345 (8), DLTLA6374 (9) y DLTLA6435 (19). El análisis anterior permite señalar que los problemas asociados a la sodicidad en el acuífero no son de consideración, sin embargo, los problemas asociados a la salinidad pueden incrementarse, aunque todavía no se observa y no existen estudios que señalen problemas de salinización de suelos en la región estudiada.

Consideraciones finales

Del volumen concesionado del acuífero Alto Atoyac se extraen para uso público urbano y para el uso agrícola el 54.4% y 32.45%, respectivamente. Esos valores muestran al acuífero altamente

urbanizado, pero también la alta dependencia que tiene de él el sector agrícola.

Los resultados del análisis de la calidad del agua subterránea, dan cuenta de un acuífero libre con condiciones de contaminación bacteriológica, pero también con presencia de niveles superiores a los establecidos en la normatividad oficial mexicana de hierro y flúor, este último puede tener implicaciones graves en la salud humana de quienes consumen esa agua. Por otro lado, con respecto a la calidad del agua para riego agrícola, los resultados muestran que el acuífero presenta adecuados niveles de sodicidad, pero no así en las condiciones de salinidad, sobre todo en el área de influencia de los pozos DTLA2575 (5), DTLA5342 (6), DTLA5345 (8), DTLA6374 (9) y DTLA6435 (19).

Es recomendable, viendo las condiciones anteriores establecer y/o mejorar las condiciones de monitoreo de la calidad del agua, incrementar los puntos de observación, sobre todo en las zonas en las que se observa la presencia de flúor. Finalmente, es de vital importancia, en los casos en los que se da el consumo directo del agua del acuífero Alto Atoyac, someterla a procesos de tratamiento para la remoción de la contaminación bacteriológica, pero también para la remoción del hierro y, sobre todo, de los altos niveles de flúor.

Referencias bibliográficas

- Aguilera, M. y Martínez, R. (1996). *Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ahamed, J., Loganathan, K. y Ananthakrishnan, S. (2013). A comparative evaluation of groundwater suitability for drinking and irrigation purposes in Pugalur area, Karur district, Tamilnadu, India. *Archives of Applied Science Research*, 5(1), 213-223.
- Aher, K. R. y Deshpande, S. M. (2011). Assessment of Water Quality of the Maniyad Reservoir of Parala Village, district Aurangabad: Suitability for Multipurpose Usage. *International Journal of Recent Trends in Science and Technology*, 1(3), 91-95.

- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S. y Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental Geology*, 36(1-2), 55-64.
- Barrios Castillo, I. (2014). *Calidad de aguas naturales y residuales en el sistema hidrográfico del Valle del Mezquital, Hidalgo, México*. [Tesis de Maestría]. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México.
- Cardona, A., Carrillo-Rivera, J. J., Herrera, G. y López, B. (2010). La contaminación del agua subterránea en México. En Aguilar Ibarra, A. *Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario*. (Pp. 308). UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2020). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el acuífero Alto Atoyac (2901), Estado de Tlaxcala*. Subdirección General Técnica/Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Deshpande, S. M. y Aher, K. R. (2011). Quality of Groundwater from Tribakeswar-Peth area of Nashik District and its Suitability for Domestic and Irrigation Purpose. *Gond. Geol. Mag.*, 26(2), 157-162.
- Deshpande, S. M. y Aher, K. R. (2012). Evaluation of Groundwater Quality and its Suitability for Drinking and Agriculture use in Parts of Vaijapur, District Aurangabad, MS, India. *Research Journal of Chemical Sciences*, 2(1), 25-31.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation water. *Soil Science*, 39, 123-133.
- Essien Obot, E. y Ubit, F. (2013). Investigation of Ikpa river water quality with consideration for domestic and agricultural uses. *Wudpecker Journal of Agricultural Research*, 2(11), 315-323.
- Flores-Márquez, E. L., Jiménez-Suárez, G., Martínez-Serrano, R. G., Chavéz, R. E. y Silva-Pérez, D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeol. J.*, 14(7), 1,216-1,230.

- Ghassem, F., Jakeman, A. J. y Nix, H. A. (1995). *Salinization of land and water resources. Human causes, extent, management and case studies*. Centre for Resource and Environmental Studies / Australian National University, Canberra.
- Grattan, S. R. y Oster, J. D. (2003). Use and Reuse of Saline-Sodic Waters for Irrigation of Crops. *Journal of Crop Production*, 7(1-2), 131-162.
- Guzmán-Colis, G., Thalasso F., Ramírez-López, M., Rodríguez-Narciso, E., Guerrero-Barrera, A. y Avelar-González, F. (2011). Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 89-102.
- Hafizan, J., Sharifuddin, M., Mohd, K., Tengku, H., Mohd, A., Mohd, E. y Mazlin, M. (2011). Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environ. Monit. Assess.*, (173), 625-641.
- Hamdy, A., Abdel-Dayem, S. y Abu-Zeid, M. (1993). Saline water management for optimum crop production. *Agric. Water Manage.* 24, 189-203.
- Hülya, B. y Hayal, B. (2007). Surface Water Quality Assessment by Environmetric Methods. *Environ. Monit. Assess.*, (131), 371-376.
- Ishaku, J. M., Ahmed, A. S. y Abubakar, M. A. (2011). Assessment of groundwater quality using chemical indices and GIS mapping in Jada area, Northeastern Nigeria. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 1(1), 35-60.
- Joshi-Dhirendra, M., Kumar, A. y Agrawal, N. (2009). Assessment of the irrigation water quality of river Ganga in Haridwar District. *Rasayan J. Chem.*, 2(2), 285-292.
- Julián-Soto, F. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(2), 167-177.

- Kankal, N., Indurkar, M., Gudadhe, S. y Wate, S. (2012). Water Quality Index of Surface Water Bodies of Gujarat, India. *Asian J. Exp. Sci.*, 26(1), 39-48.
- Khan, N., Malik, A. y Nehra, K. (2021). Groundwater hydro-geochemistry, quality, microbiology and human health risk assessment in semi-arid area of Rajasthan, India: a chemometric approach. *Environ Monit Assess*, 193-234. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08979-2>
- Kelly, W. P. (1940). Permissible composition and concentration of irrigated waters. *Proceedings of the A.S.C.F.*, 607.
- Mancilla Villa, O. (2012). *Índices de Salinidad y Calidad de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz*. [Tesis de Doctorado]. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México.
- Martínez, L. y Serra, A. (s.f.). *Estudio de la calidad agronómica del agua de riego de las islas baleares*. S/E.
- Miletto, M., Kirchheim, R., Rucks, J., Bello, E., da Franca, N. y Dos Anjos, R. (2004). *El recurso invisible Acuíferos transfronterizos: una oportunidad de cooperación internacional*. Series sobre elementos de Políticas, Número 3. Organización de Estados Americanos.
- Mohd, S., Hafizan, J., Sharifuddin M. y Nur, H. (2011). Surface River Water Quality Interpretation Using Environmetric Techniques: Case Study at Perlis River Basin, Malaysia. *International Journal of Environmental Protection*, 1(5), 1-8.
- Nag, S. K. y Ghosh, P. (2013). Variation in Groundwater Levels and Water Quality in Chhatna Block, Bankura District, West Bengal—A GIS Approach. *Journal Geological Society of India*, 81, 261-280.
- Nagaraju, A., Suresh, S., Killham, K. y Hudson-Edwards, K. (2006). Hydrogeochemistry of Waters of Mangampeta Barite Mining Area, Cuddapah Basin, Andhra Pradesh, India. *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 30, 203-219.
- Obiefuna, G. I. y Sheriff, A. (2011). Assessment of Shallow Ground Water Quality of Pindiga Gombe Area, Yola Area, NE, Nigeria for Irrigation and Domestic

- Purposes. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(2), 31-141.
- Palacios, O. y Aceves, E. (1970). *Instructivo para el registro, muestreo e interpretación de datos de calidad del agua para riego*. Colegio de Posgraduados, Chapingo.
- Papaioannou, A., Dovriki, E., Rigas, N., Plageras, P., Rigas I., Kokkora, M. y Papastergiou, P. (2010). *Assessment and Modelling of Groundwater Quality Data by Environmetric Methods in the Context of Public Health*. *Water Resour. Manage.* Doi: 10.1007/s11269-010-9605-0
- Peinado-Guevara, H. J., Green-Ruiz, C., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O. A., Delgado-Rodríguez, O., Belmonte-Jiménez, S. y Ladrón de Guevara, M. A. (2011). Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica*, 21(1), 63-76.
- Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J. y Sánchez, J. V. (2003). Efecto del riego con agua de mala calidad sobre la desertificación de zonas semi-áridas en Murcia, España. *Geoderma*, 113, 109-125.
- Porta, J. (2010). *Introducción a la Edafología: uso y protección de suelos*. Editorial Mundi-Prensa.
- Price, M. (2003). *Agua subterránea*. Limusa-Noriega Editores.
- Rifat Ara, W., Aabid Hussain, M., Aasimah, T., Arshid, J. y Yousuf, A. R. (2014). Preliminary study on irrigational quality of some ground water sources of Kashmir, India. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(2), 318-323.
- Rodríguez, M., D'Urso, C., Rodríguez, G. y Sales, A. (2008). Evaluación de la Calidad de Aguas para Riego de la Cuenca del Río Calera, Tucumán, Argentina. *Ciencia*, 3(7), 16-27.
- Romero, R. (2009). *Calidad del agua*. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería.
- Ruda, E., Mongiello, A., Acosta, A., Ocampo, E. y Contini, L. (2005). Calidad del agua subterránea con fines de riego

- suplementario en Argiudoles del Centro de Santa Fe, Argentina. *Agricultura Técnica (chile)*, 65(4), 411-420.
- Sharma, D. P. y Rao K.V., G. K. (1998). Strategy for long term use of saline drainage water for irrigation in semi-arid regions. *Soil Tillage Res.*, 48, 287-295.
- Todd, D. K. (1980). *Groundwater Hydrology*. Wiley International Edition, John Wiley and Sons. Inc.
- Valdez-Jiménez, L., Fregozo, C. S., Beltrán, M. M., Coronado, O. G. y Vega, M. P. (2011). Effects of the fluoride on the central nervous system. *Neurología (English Edition)*, 26(5), 297-300.
- Vega, A. G. G., Zárate, G. H., Yáñez, P. A. J. y González, S. H. (2017). *Determinación de hierro y manganeso en el agua subterránea del municipio de Apan, Hidalgo, México*.
- Wijnen, M., Augeard, B., Hiller, B., Ward, C. y Huntjens, P. (2012). Managing the invisible understanding and improving groundwater governance. *Draft Report no. 10*. <http://www.worldbank.org/water>.
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and Use of Irrigation Waters*. US Dept. Agric. Circ. 969.



CAPÍTULO 4. CALIDAD DEL AGUA Y CONTAMINANTES DE LA CUENCA ALTO ATOYAC

S. Alejandro Lozano Morales¹

Introducción

En la actualidad uno de los problemas más severos y que va en aumento a nivel mundial es la contaminación del agua por diversas fuentes; unas de origen antropogénicas que van desde actividades industriales hasta domésticas, y otras por fuentes naturales provenientes del subsuelo en gran medida ocasionada por procesos de meteorización. Esta problemática se atribuye esencialmente a la acumulación sustancias contaminantes; las cuales, han llegado en algunos lugares a magnitudes preocupantes, puesto que han generado una gran cantidad de consecuencias nocivas tanto para la salud de los seres vivos como para la preservación del equilibrio del medio ambiente en general.

En este contexto, en México una de las cuencas más contaminadas es el *sistema fluvial Atoyac-Zahuapan*, al interior de la Cuenca Alto Atoyac, que abarca parcialmente los estados de Tlaxcala, Puebla y México (ver Figura 1), esta cuenca está constituida por 84 municipios (ver Tabla 1); forma parte de la cuenca hidrográfica del río Balsas, en la región hidrológica RH18 y IV administrativa (Cotler, 2007), con una extensión aproximada de 4,011 km², la cual desemboca en la presa de Valsequillo (presa Manuel Ávila Camacho). En el estado de

¹ Investigador por México CONACyT-CIQA. Saltillo, Coahuila. México, correo-e: alejandro.lozano@ciqa.edu.mx

Puebla cubre un área de 2,420 km² e incluye a 22 municipios; en tanto que, en el estado de Tlaxcala tiene una superficie de 1,591 km², incluyendo 47 municipios de la región, con 8 millones de habitantes (Ascencio, 2016; INEGI, 2021; Sánchez et al., 2012).

Figura 1. Mapa de la división de las Regiones Hidrológica de la República Mexicana



Fuente: Cotler (2007).

Tabla 1. Municipios pertenecientes a la Cuenca Alto Atoyac en Tlaxcala, Puebla y México

Estado	Municipio	Porcentaje (%)	
		Total	Parcial
Tlaxcala		51.80	
	Contla de Juan Cuamatzi		0.65
	Tetlatlahuca		0.65
	Santa Cruz Tlaxcala		0.64
	Papalotla de Xicohtécatl		0.58
	Tepetitla de Lardizábal		0.57
	Terrenate*		0.56
	Sanctórum de Lázaro Cárdenas*		0.42

Calidad del agua y contaminantes de la cuenca Alto Atoyac

	Cuaxomulco		0.42
	Tepeyanco		0.41
	Acuamanala de Miguel Hidalgo		0.37
	Mazatecochco de José María Morelos		0.36
	Totolac		0.34
	Tenancingo		0.33
	Nanacamilpa de Mariano Arista*		0.30
	La Magdalena Tlaltelulco		0.29
	Apetatitlán de Antonio Carvajal		0.29
	Amaxac de Guerrero		0.28
	San Damián Texóloc		0.25
	Santa Catarina Ayometla		0.25
	Santa Ana Nopalucan		0.23
	Santa Apolonia Teacalco		0.20
	San Jerónimo Zacualpan		0.19
	Xicohtzinco		0.18
	Tocatlán*		0.18
	Huamantla*		0.16
	Lázaro Cárdenas*		0.15
	Santa Isabel Xiloxotla		0.15
	Santa Cruz Quilehltla		0.14
	San Lorenzo Axocomanitla		0.11
	San Juan Huactzinco		0.11
Puebla		44.60	
	Puebla*		12.05
	Tlahuapan		7.72
	Huejotzingo*		4.02
	San Salvador el Verde		2.73
	San Martín Texmelucan		2.23
	Chiautzingo		2.01
	San Pedro Cholula*		1.78
	San Andrés Cholula		1.57
	Amozoc*		1.55
	Ocoyucan*		1.29

	San Matías Tlalancaleca		1.26
	San Felipe Teotlalcingo		0.98
	Cuautlancingo		0.95
	Coronango		0.91
	Calpan*		0.58
	Juan C. Bonilla		0.55
	Tlaltenango		0.53
	Domingo Arenas		0.40
	Cuautinchán*		0.34
	San Jerónimo Tecuanipan*		0.26
	San Gregorio Atzompa*		0.25
	San Miguel Xoxtla		0.21
	Chignahuapan*		0.19
	Tzicatlacoyan*		0.16
	Tepatlxco de Hidalgo*		0.07
	Ixtacamaxtitlán*		0.01
México		3.60	
	Ixtapaluca*		2.38
	Texcoco*		0.64
	Tlalmanalco*		0.56
	Chalco*		0.02

Fuente: Landsat (2019).

Cabe recalcar que, en este sistema fluvial se encuentra la cuarta zona más poblada de México (Landsat, 2019) (ver Figura 2), que desde los años 60 ha experimentado un crecimiento urbano e industrial acelerado (Ramírez y López, 2018). Esto debido al establecimiento de parques y corredores industriales; trayendo consigo actividades propias de las industrias textil, petroquímica, automotriz, metalúrgica, metalmecánica, cerámica, electrónica, químico-farmacéutica, papelera (Inclán et al., 2015) sumadas a actividades agrícolas, ganaderas y manufactureras (ver Figura 3) (García de León, 2018; José, 2017; Mora et al., 2021).

Figura 2. Cuenca hidrológica Alto Atoyac. Forma parte de la cuenca hidrográfica del Balsas, en la región hidrológica RH18 y IV administrativa



Fuente: Landsat (2019).

Mismas, que se asume que el mal manejo de las aguas residuales industriales ha contribuido, en gran medida, a la problemática de la contaminación de este sistema fluvial. Además, sumándose a esta problemática, las descargas municipales que son vertidas directamente al río repercuten directamente en la calidad del agua (Sandoval et al., 2009). Desafortunadamente, esta situación ha favorecido a padecer actualmente un estado severo de contaminación del acuífero impactando esencialmente en un deteriorado ambiental y en la salud de la población más vulnerable (ver Figura 4).

Figura 3. Principales fuentes de contaminación de la Cuenca Alto Atoyac e impactos en la salud



Fuente: Después de Moral et al. (2021).

Tomando en consideración lo anterior, este capítulo se enfoca en una revisión sistemática de la literatura dirigida esencialmente a la contaminación química que padece actualmente el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan; haciendo énfasis, dada su alta vulnerabilidad, en una de las zonas considerada de mayor impacto socio-ambiental como lo es la localidad de San Mateo Ayecac y sus alrededores (cuyas coordenadas geográficas son $19^{\circ} 28' 17''$, $-98^{\circ} 39' 61''$), ubicada dentro del municipio de Tepetitla de Lardizábal en el estado de Tlaxcala, México. Cabe mencionar que en este municipio desde los años 90 se comenzaron a presentar, de manera incidente, casos de muerte por cáncer, insuficiencia renal, púrpura trombocitopénica y leucemia entre sus pobladores (Ramírez y López, 2018). Aunado a que este municipio ya ha sido referido como un lugar altamente contaminado en el expediente de la Recomendación No. 10/2017 de la Comisión Nacional de Derechos Humanos en relación a la contaminación del Río Atoyac-Zahuapan y sus afluentes (ver Figura 4) (Hernández, 2021; No. 10/2017 RECOMENDACIÓN, 2017).

Figura 4. Municipios referidos en la Recomendación 10/2017 de la CNDH en relación a la contaminación del río Atoyac, Xochiac y sus afluentes de San Martín Texmelucan y Huejotzingo, en el estado de Puebla; y en los municipios de Tepetitla de Lardizábal, Nativitas e Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, en el estado de Tlaxcala



Fuente: No. 10 /2017 RECOMENDACIÓN (2017).

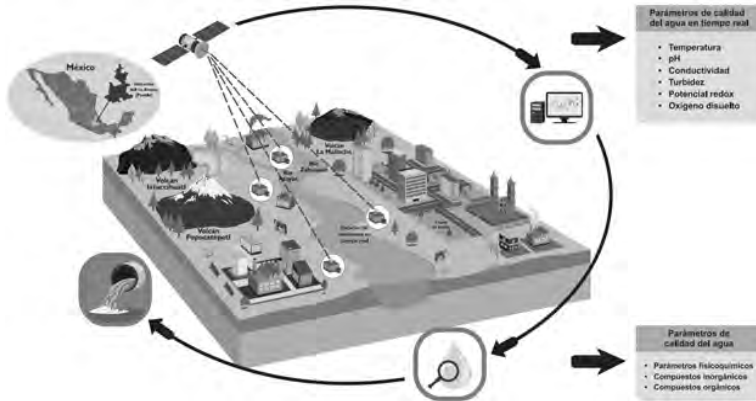
Particularmente, en la siguiente sección se presenta un resumen referente a la calidad del agua, relacionándola con la información cualitativa y cuantitativa de diferentes contaminantes orgánicos, inorgánicos y microbiológicos (colorantes, agroquímicos, compuestos farmacéuticos, derivados de la industria petroquímica y automotriz, compuestos orgánicos, entre otros); con la intención de realizar un primer acercamiento y ofrecer, desde una perspectiva holística, propuestas integrales de saneamiento de la cuenca a través de tecnologías actuales que podrían atender la variedad de contaminantes detectados a la fecha en aguas superficiales de la Cuenca Alto Atoyac, y en sus principales afluentes de origen antropogénico (Behera et al., 2021). Esto a fin de establecer, en un futuro, las bases para la creación de un modelo científico-co-

munitario integral y transdisciplinario para el mejoramiento de la calidad del agua de la Cuenca Alto Atoyac en las comunidades de estudio.

Principales contaminantes en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan

A pesar de que han sido muchos los esfuerzos que se han llevado a cabo para la restauración de la Cuenca Alto Atoyac, estos no han tenido el éxito deseado probablemente debido a que no contemplan otros fenómenos que afectan a la calidad del agua. Particularmente, los parámetros estudiados tradicionalmente están basados en los parámetros fisicoquímicos, tales como temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (OD), coeficiente de absorción espectral (CAE), potencial de reducción de óxido (PRO), turbidez (TURB), demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), conductividad eléctrica (CE), sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos totales disueltos (STD), entre otros (Calidad y Agua, 2020); que si bien brindan información sumamente relevante para determinar la calidad del agua, no obstante debería considerarse la conjugación de algoritmos a fin evaluar el Índice General de Contaminación (Hernández-Ramírez et al., 2019) e integrar un panorama suficientemente claro sobre los diversos tipos de “nuevos” contaminantes, tales como colorantes, agroquímicos, compuestos farmacéuticos, metales pesados, microplásticos, entre otros, que también deben ser abarcados dentro de estos planteamientos a favor de atender la problemática, esto sin menospreciar los estudios de los sedimentos (ver Figura 5) (Hernández-Ramírez et al., 2019; Rodríguez-Espinosa et al., 2018).

Figura 5. Detección, procedencia y riesgos ambientales asociados de los contaminantes de la calidad del agua durante eventos de anomalías en el río Atoyac



Fuente: Hernández-Ramírez et al. (2019).

Por ende, se ha realizado una agrupación de los principales contaminantes encontrados en este sistema a partir de su naturaleza y características químicas, con el propósito de establecer las bases o el punto de partida que contribuya a proponer tecnologías mucho más precisas y enfocadas que sean capaces de sopesar el deterioro ambiental de la Cuenca Alto Atoyac (Hernández-Ramírez et al., 2019).

Compuestos orgánicos, colorantes e industria textil

Las industrias textiles producen efluentes con altos niveles de compuestos tóxicos y recalcitrantes (compuestos con una tasa nula o muy baja biodegradabilidad), tales como colorantes, tintes y pigmentos, que generan afectaciones y desequilibrio sobre el medio ambiente y el ser humano (Lellis et al., 2019). La clasificación de estas sustancias se basa en su composición química, la cual se caracteriza por una alta estabilidad química debido a la combinación de grupos *azo* con anillos aromáticos (~70%).

Además, la presencia de estos contaminantes y sus residuos vertidos en los efluentes, tienen un impacto negativo

especialmente en los ecosistemas acuáticos debido a sus efectos **tóxicos**, mutagénicos, clastogénicos y cancerígenos, dado que se acumulan a lo largo de la cadena trófica de la fauna acuática, e interrumpen la circulación del oxígeno y la absorción de luz en sistemas acuáticos, promoviendo con esto ambientes altamente anóxicos (Berradi et al., 2019; Mani et al., 2018).

Los contaminantes presentes en estos efluentes también incluyen sólidos en suspensión, aceites minerales (agentes antiespumantes, grasa, lubricantes de hilatura), agentes surfactantes no biodegradables (etoxilatos de alquilfenol, etoxilatos de nonilfenol) y compuestos orgánicos fenólicos procedentes de los procesos de acabado en húmedo, sustancias orgánicas halogenadas derivadas del uso de disolventes durante el blanqueo y tintes. Para el caso concreto de los tintes textiles, estos se pueden considerar sustancias no biodegradables debido a su naturaleza xenobiótica, estructura aromática, alta resistencia térmica y alta fotoestabilidad (Sharma et al., 2021).

Además, las aguas resultantes del proceso de tintura contienen pigmentos, halógenos, metales pesados (cobre, cromo, cinc, cobalto y níquel), aminas (colorantes azoicos); agentes de dispersión, antiespumantes, álcalis, sales y agentes reductores/oxidantes. Durante este proceso también se utilizan colorantes de tipo *azo* que contienen bencidina, colorantes clorados, aminas aromáticas y anilinas (sustancias carcinogénicas), entre otras (P. En & Ambientales, 2018). En la Tabla 2, se presenta el listado de compuestos orgánicos volátiles identificados en el Agua Residual Textil del municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el estado de Tlaxcala (Landsat, 2019; Sagrario et al., 2020).

Particularmente, dado que una de las actividades prioritarias de la zona de estudio, referente al municipio de Tepetitla de Lardizábal, es el proceso del lavado en el caso de la mezclilla, este textil se caracteriza por utilizar el *Reactivo Blue 19* permanece en el medioambiente aproximadamente 46 años (Cao et al., 2019; Weber y Stickney, 1993).

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) están relacionadas con las descargas de aguas residuales (NOM-001 y NOM-002) y se sustentan en los niveles máximos permisibles (NMP) de ocho indicadores de calidad de agua: demanda química de oxígeno

y demanda bioquímica de oxígeno (DQO y DBO) y las concentraciones de seis metales pesados (DOF, NOM-001-1996; NOM-002-1996). La limitante de estas NOM's es que no evalúan el efecto de estas sustancias peligrosas y sus correspondientes impactos. (CONAGUA, 1997; Sagrario et al., 2020)

Tabla 2. Determinación de compuestos orgánicos volátiles en el Agua Residual Textil en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el estado de Tlaxcala.

Sustancia	Concentración (µg/L)
Benceno	0.58
Clorobenceno	0.37
Cloroformo	0.98
Cloruro de vinilo	0.41
1,4 diclorobenceno	0.33
1,2 dicloroetano	0.30
1,1 dicloroetileno	0.23
Hexaclorobutadieno	0.13
Tetracloroetileno	0.13
Tetracloruro de carbono	0.73
Tricloroetileno	0.70

Fuente: Después de Landsat (2019); Sagrario et al. (2020).

En la Tabla 3, se presentan las concentraciones contaminantes orgánicos no volátiles en las muestras de Agua Residual Textil en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el Estado de Tlaxcala. Puntualmente, se ha observado que los niveles de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BETX) superan los límites máximos permitidos establecidos por la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 aunado a que estas sustancias han demostrado tener propiedades tóxicas y que pueden producir patologías neuroconductuales, tales como mala coordinación, actividad locomotora elevada, medidas indicativas de ansiedad e impulsividad, aprendizaje y memoria comprometidos (Davidson et al., 2021). Además, su fácil dispersión en el ambiente y alta solubilidad en agua presentan altos riesgos de contaminar cuerpos de agua subterránea.

Tabla 3. Determinación de compuestos orgánicos no volátiles en el Agua Residual Textil en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el estado de Tlaxcala

Sustancia	Concentración (mg/kg)
Benceno	35
Tolueno	150
Etilbenceno	27
Xileno (suma de isómeros)	103
Benzo (a) pireno	13
Dibenzo (a, h) antraceno	20
Benzo (a) antraceno	19
Benzo (a) fluoranteno	13
Benzo (k) fluoranteno	98
Indeno (1,2,3-cd) pireno	15

Fuente: Después de Sagrario et al. (2020).

Plaguicidas

Los plaguicidas se emplean como sustancias para proteger los cultivos contra plagas de insectos, malas hierbas y microorganismos que generalmente son nocivas para las cosechas. El uso continuo, excesivo o mal manejo de una amplia gama de plaguicidas eventualmente hace que sus residuos aparezcan en muchos sitios inesperados, con esto, convirtiéndose en potenciales fuentes de contaminación.

Al respecto, una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas suele darse al utilizar los ríos para verter residuos de agroquímicos, y aunque el suelo agrícola es el receptor inicial de los agroquímicos aplicados, los cuerpos de agua adyacentes a estas áreas suelen ser los receptores finales (Juárez-Santacruz et al., 2013). En este sentido, la presencia de pesticidas en cuerpos de agua se ha atribuido a los derivados de la escorrentía del campo agrícola y las aguas residuales industriales. Eso es debido a que, en el mejor de los casos, los plaguicidas que parcialmente se degradan suelen acumularse en el suelo o se movilizan de un sitio a otro en

forma de subproductos secundarios o metabolitos potencialmente **tóxicos** (Betancourt y Díaz, 2018).

Además, cabe señalar que la concentración de plaguicidas acumulados en el agua paulatinamente puede incrementarse a lo largo de la cadena alimentaria repercutiendo en la producción de alimentos potencialmente peligrosos para su consumo. A tal efecto, es importante destacar que la exposición crónica a plaguicidas a través de la ingestión de agua impacta considerablemente en la salud de seres humanos, sin mencionar a la flora y fauna, puesto que puede reducir la capacidad de respuesta inmunitaria, interrumpen el equilibrio hormonal, desencadenan problemas relacionados con la reproducción, presentan efectos cancerígenos y reducen la inteligencia especialmente en los niños en la etapa de desarrollo corporal (Gupta, 2018; Syafrudin et al., 2021).

En la Tabla 4 se agrupan los plaguicidas de acuerdo con su uso y su clasificación química, tales como insecticidas, herbicidas y fungicidas, que son los más utilizados en tierras agrícolas y entornos urbanos; algunos de ellos detectados en la zona de estudio correspondiente al municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Tabla 4. Clasificación de plaguicidas según su uso

Plaguicida	Clase: Sustancia
Insecticida	Organoclorado: Endosulfán, Clordano*, Aldrín*, Deldrín*, DDT*, Lindano*, Organofosfato: Diazinón, Malatión*, Paratión, Clorpirifos Carbamato: Aldicarb, Carbofuran, Carbaryl Piretroide: Deltametrina, Fenpropatrina Neonicotinoide: Acetamiprida, Tiametoxam Degradado de fenilpirazol: Sulfóxido de Aldicarb, Sulfato de Endosulfán
Herbicida	Triazina: Atrazina, Cianazina Aminofosfonato: Glifosato* Cloroacetamida: Alaclor, Butaclor, Dimetenamida, Metolaclor
Fungicida	Benzamida: fluopicolida, zoxamida Carboxamida: Boscalid captofol Hidrocarburo clorado: Hexaclorobenceno, Diclorometano (INECC, 2019)* Organofosfato: Edifenphos, iprobenfos Clorofenilo: diclorán, quintoceno

* Reactivos detectados en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan
Fuente: Berger (2019); Hernández-Ramírez et al. (2019); INECC (2019).

Además, otra propuesta de clasificación de plaguicidas se basa en su composición química, por lo que en la Tabla 5 se describen los componentes principales de algunos de los grupos comunes de plaguicidas. Cabe mencionar que, probablemente gran cantidad de plaguicidas no han sido estudiados ni reportados, pese a su uso en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan.

Tabla 5. Clasificación de plaguicidas según su composición química y algunas características generales

Grupo	Composición química	Características	Efectos
<i>Organoclorados*</i> : - DDT, Aldrín, Lindano, Clordano.	Átomos lipofílicos y no polares, incluidos carbono, cloro.	Lípido soluble, tóxico para la variedad. de animales y persistencia a largo plazo.	Tienden a acumularse en el tejido graso de animal, biomagnificación efecto a través de la cadena alimentaria.
<i>Organo-fosforados*</i> : - Malatión, Diazinón, Paratión.	Alifáticos, cíclicos y heterocíclicos poseer átomo de fósforo central en molécula.	Soluble en solvente orgánico y en agua. Menos persistencia que los hidrocarburos clorados.	Tienden a infiltrarse en el acuífero y llegar a las aguas subterráneas. Afectar sistema nervioso central.
<i>Piretroides*</i> : - Piretrinas.	Alcaloide obtenido de pétalos de especies de plantas, a saber: Chysanthemum cinerariefolium.	Menos persistente que otros plaguicidas, por lo tanto, es más seguro estar utilizado como insecticidas domésticos.	Afecta el sistema nervioso.
<i>Carbamatos*</i> : - Carbarilo.	Estructura química basada en alcaloide de una especie vegetal, a saber: Physostigma venenosum.	Persistencia relativamente baja.	Solo matan insectos de espectro limitado, pero altamente tóxico para los vertebrados.
Biológico*: - <i>Bacillus thuringiensis</i> , Bt y su subespecie.	Microorganismos, virus y sus productos metabólicos	Aplicado contra plagas forestales (mariposas) y cultivos.	Afecta a otras orugas

* Reactivos detectados en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan
Fuente: Syafrudin et al. (2021); Berger (2019); Hernández-Ramírez et al. (2019); INECC (2019).

En este sentido, los plaguicidas organoclorados, comprenden un grupo de compuestos orgánicos de gran peso molecular, que en su mayoría son derivados de hidrocarburos complejos, en los que un hidrógeno es sustituido por cloro. Estos plaguicidas tienen ciertas características fisicoquímicas como alta persistencia, toxicidad, potencial de transporte de largo alcance y, debido a su bioacumulación, pueden causar graves trastornos endocrinos en aves y peces, por lo que la mayoría de ellos han sido prohibidos en la agricultura en todo el mundo. En cuanto a los plaguicidas organofosforados, están compuestos químicamente por ésteres, amidas o tioles derivados del ácido fosfórico. Su mecanismo tóxico es a nivel sináptico, ya que al enlazarse con la acetilcolinesterasa inhibe su actividad enzimática, originando la estimulación de receptores a nivel muscarínicos, nicotínicos y efectos en el sistema nervioso central. Además, los organofosforados tienen una neurotoxicidad aguda para los insectos y los animales.

Los plaguicidas carbamatos, son productos derivados del ácido carbámico, compuestos biodegradables mediante a la exposición a los rayos solares, no son bioacumulables, son liposolubles y en su mayoría son de mediana y baja toxicidad, con excepción del Aldicarb y Carbofuran que son de alta toxicidad para el ser humano. De la misma forma que los compuestos organofosforados, los carbamatos también afectan las señales nerviosas que resultan en la muerte de la plaga por envenenamiento. Los plaguicidas piretroides son sustancias químicas que actúan como moduladores de los canales de sodio, son altamente tóxicos debido a que pueden dañar la glándula tiroides y el hígado, también son altamente dañinos para organismos acuáticos como peces, moluscos y artrópodos, y algunos de ellos están listados como disruptores endocrinos ambientales globales (Zheng et al., 2016).

Compuestos farmacéuticos

Otra problemática de contaminación que afecta al sistema fluvial Atoyac-Zahuapan tiene su origen en la liberación de compuestos farmacéuticamente activos (PhAC) al medio ambiente, fenómeno que cada vez se observa con mayor frecuencia; considerando que

los principales sistemas receptores de estos microcontaminantes son los cuerpos de agua superficial, tales como ríos, lagos o aguas subterráneas poco profundas, aguas residuales sin tratar, y también las aguas residuales tratadas, esto es debido a que los actuales procesos convencionales de tratamiento de aguas residuales son incapaces de eliminar todos los productos farmacéuticos del agua contaminada. En este contexto, cabe remarcar que las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) podrían ser una fuente importante de contaminantes ambientales emergentes, porque las concentraciones de PhAC en el agua cruda están determinadas fundamentalmente por la eficiencia de los procedimientos de tratamiento de aguas residuales (Kondor et al., 2021).

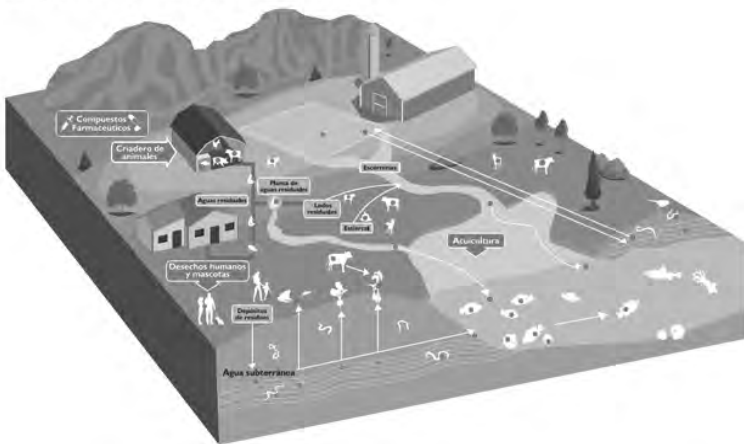
Más aún, a pesar de que la mayoría de los PhAC detectados han sido cuantificados en varias matrices ambientales, contenidos a bajas concentraciones que van del orden de ngL^{-1} hasta μgL^{-1} , la presencia y los riesgos de los PhAC y sus metabolitos en el agua y suelos son una preocupación mundial creciente. En este sentido, el problema se ve agravado por el hecho de que los efectos mutagénicos y cancerígenos, entre otras patologías, se han relacionado con ciertos grupos de PhAC. Particularmente, se sabe que algunos PhAC; como las hormonas, sustancias psicoactivas, ansiolíticos, antiepilépticos, antibióticos, plantean riesgos importantes para los organismos acuáticos (Nawaz y Sengupta, 2018).

Solo por mencionar un caso particular, los antibióticos, antivirales, antiparasitarios y antifúngicos y sus metabolitos pueden ingresar al medio ambiente a través de una variedad de vías, que incluyen sitios de fabricación, aguas residuales no tratadas de hogares y hospitales, plantas de tratamiento de aguas residuales y corrientes de desechos municipales, cría de animales, lodos de aguas residuales, entre otros (ver Figura 6). Estos fármacos son cada vez más ineficaces debido a la resistencia desarrollada por su uso excesivo o inadecuado. Esto hecho trae consigo graves consecuencias para la salud humana y animal, y también posiblemente para la salud de las plantas, e impactos negativos en la alimentación, el medio ambiente y la economía mundial. Cabe destacar que, en todo el mundo, alrededor de 700,000 personas mueren cada año por infecciones resistentes

debido a que los medicamentos antimicrobianos disponibles se han vuelto menos efectivos para matar patógenos resistentes a la meticilina (Berkner et al., 2014; Hafiz y Jamil, 2021). The Independent O’Neill Review (Shankar, 2016), estima que esto aumentará a 10 millones para 2050, más muertes que el cáncer y la diabetes combinados en la actualidad.

Figura 6. Vías de exposición de antibióticos en el medio ambiente. Los residuos de antibióticos se representan simbólicamente como puntos

Incorporación de fármacos al medio ambiente



Fuente: Después de Berkner et al. (2014); Hafiz y Jamil (2021).

Aunado a esto, recientemente algunas determinaciones cuantitativas (ver Tabla 6) se han podido llevar a cabo mediante el empleo de cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas GC/MS para demostrar la presencia de naproxeno y diclofenaco (medicamentos antiinflamatorios no esteroides), y triclosán (agente antibacteriano) en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan (Isaac-Olivé y Navarro-Frómata, 2019).

Tabla 6. Ejemplo de algunos compuestos farmacéuticos cuantificados en sistema fluvial Atoyac-Zahuapan

Compuesto farmacéutico	Concentración anual promedio cuantificada [μgL^{-1}]
Naproxeno	0.95
Diclofenaco	0.28
Triclosán	7.45

Fuente: Isaac-Olivé y Navarro-Frómata (2019).

Metales pesados

Los suelos agrícolas y el agua constituyen la base fundamental para la producción de alimentos; sin embargo, a causa de ciertos procesos naturales y antropogénicos pueden acumularse algunos tipos de contaminantes, que en elevadas concentraciones son altamente tóxicos, entre ellos los denominados metales pesados; catalogados así debido a sus características químicas fundamentalmente referidas a sus altos valores de peso atómico y densidad; cabe señalar que el término “metal pesado” se ha utilizado para describir a los elementos químicos metálicos y metaloides que son tóxicos para los seres humanos y el medio ambiente.

Además, hay que recalcar que el aumento de la contaminación por metales pesados ha surgido debido a actividades antropogénicas que son la principal causa de contaminación, tales como la minería del metal, la fundición, la lixiviación de metales a partir de vertederos de desechos, excrementos, estiércol de ganado y pollo, escorrentías, automóviles y obras viales, entre otras. Aunado a que el uso de metales pesados en la agricultura ha sido la fuente secundaria de contaminación mediante el uso de agroquímicos; sin menospreciar que las causas naturales también pueden aumentar la contaminación por metales pesados, tales como la actividad volcánica, la corrosión de los metales, la evaporación de metales del suelo y el agua, la resuspensión de sedimentos, la erosión del suelo y la meteorización geológica, principalmente (ver Figura 7).

Figura 7. Concentraciones de metales y sus posibles riesgos ecológicos en sedimentos fluviales de la cuenca del río Atoyac, centro de México: influencias volcánicas y antropogénicas



Fuente: Después de Rodríguez-Espinosa et al. (2018).

Hay que mencionar, además de que los metales pesados no se pueden descomponer y no son biodegradables y que cuando nuestros cuerpos interactúan con estos, se bioacumulan en nuestro sistema, esta bioacumulación provoca complicaciones biológicas y fisiológicas. En consecuencia, hay que considerar que los metales pesados pueden entrar en el ser humano de cuatro formas: ingestión de alimentos contaminados; inhalación de la atmósfera, beber agua contaminada, y debido al contacto con la piel. Los efectos sobre la salud a largo plazo de la exposición a metales pesados, tanto en entornos laborales como ambientales implican toxicidades multiorgánicas que incluyen, entre otras, alteraciones de los procesos neurológicos, cognitivos y metabólicos, desregulación del sistema inmunológico, carcinogénesis y, a veces, discapacidades permanentes.

En este contexto y atendiendo al enfoque de este libro, en la Tabla 7 se agrupan algunos de los metales encontrados en las aguas de la Cuenca Alto Atoyac tales como As, Al, Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, Vn, Mb, Hg, Co, Zr, Se, Sc, Mn, Cd y Cr (S. En et al., 2019; Sagrario et al., 2020). Así por ejemplo, en un estudio realizado sobre la disposición de metales pesados en el agua, suelo, alfalfa

(siendo la alfalfa una planta considerada como acumuladora de metales pesados) y leche de vaca de la región de Tepetitla se concluyó que las plantas de alfalfa contenían metales pesados en las partes comestibles, y el consumo de éstas por los animales representa un alto riesgo a la salud, debido a la acumulación que se puede generar por el consumo crónico, principalmente de Cd, Pb y As; que están en niveles de incumplimiento de las normas internacionales (Castro-González et al., 2018). Además, este estudio indicó que el consumo de leche de vaca que contenía pequeñas cantidades de metales pesados de forma individual o mixta, y de forma crónica, podría ser una de las causa del riesgo de contraer enfermedades cancerígenas y no cancerígenas, tal como lo ha relacionado la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) a través de la clasificación de estos contaminantes en cuatro grupos mostrados en la Tabla 7 (Bonilla y Fernández, 2014; Briffa et al., 2020; Castresana et al., 2018; Castro et al., 2017; Kumar et al., 2019; Schroeder y Mitchener, 1971; Zapór et al., 2015).

Tabla 7. Clasificación de carcinogenicidad por metales pesados

Grupo	Nivel de carcinogenicidad en humanos	Evidencia	Metales pesados
I	Carcinogénico	Evidencia suficiente en humanos	<ul style="list-style-type: none"> • Aluminio* • Arsénico* • Cadmio* • Cromo VI* • Níquel*
IIA	Probablemente cancerígeno	Evidencia limitada en humanos, evidencia suficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> • Plomo*
IIB	Probablemente cancerígeno	Evidencia limitada en humanos, no hay evidencia suficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> • Vanadio* • Molibdeno* • Mercurio* • Níquel metálico y aleaciones* • Plomo* • Cobalto* • Estroncio* • Circonio*
III	Carcinogenicidad no clasificable	Evidencia insuficiente en humanos, evidencia suficiente en animales	<ul style="list-style-type: none"> • Cromo III* • Cobre* • Mercurio* • Selenio* • Escandio* • Arsénico y compuestos orgánicos de arsénico no metabolizados por humanos*

IV	Probablemente no cancerígeno	La evidencia sugiere que no hay propiedades cancerígenas en humanos o animales.	<ul style="list-style-type: none"> • Manganeso* • Plata • Zinc* • Fe*
----	------------------------------	---	---

* Algunos metales detectados en el sistema fluvial Atoyac-Zahua-pan.

Fuente: Schroeder y Mitchener, (1971); Bonilla y Fernández (2014); Zapór et al., (2015); Castro et al. (2017); Castresana et al. (2018); Kumar et al. (2019); Briffa et al. (2020).

Se debe agregar que, el exceso de metal y sus efectos de toxicidad dependen de ciertos factores como la ingestión o inhalación del metal, la velocidad de entrada del metal, la distribución tisular y la concentración alcanzada y, por último, la velocidad de excreción del metal. En consecuencia, los mecanismos de toxicidad comprenden la inhibición de la actividad enzimática, la síntesis de proteínas, las variaciones en la función del ácido nucleico y los cambios en la permeabilidad de la membrana celular. Por ello es importante realizar investigaciones que ayuden a determinar el grado de riesgo, así como establecer programas de monitoreo constante, para evitar la presencia de elementos tóxicos en la cadena alimenticia en las regiones analizadas, y con ello prevenir trastornos a la salud de los pobladores y al medioambiente en general.

Parámetros químicos: nitrógeno, boro, fósforo, dureza, salinidad y conductividad eléctrica

La calidad del agua de riego está determinada por la concentración y composición de los iones constituyentes que se encuentran disueltos en ella. Por lo tanto, es importante realizar la determinación analítica de los elementos iónicos que se encuentren en sus diferentes cauces. Esto, con la finalidad comprender los procesos de salinización y la sodificación. Por lo tanto, el estudio de los parámetros químicos tales como demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), nitrógeno total (NT), alcalinidad (HCO_3^-), cloruros, sulfatos (SO_4^{2-}), dureza $CaCO_3$ (DT), dureza

al calcio CaCO_3 (DCa^{2+}), dureza al magnesio CaCO_3 (DMg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), fósforo (P-PO_4) y boro (B), entre otros, son de vital importancia (Bonilla et al., 2007; Calidad y Agua, 2020).

Con relación a esto, uno de los parámetros frecuentemente utilizados para evaluar la calidad del agua de riego es mediante la determinación de la concentración total de sales disueltas, usualmente cuantificada como conductividad eléctrica (CE). Cabe recordar que, la conductividad eléctrica de una sustancia se define como “la habilidad de conducir o transmitir electricidad”. Concretamente, se puede establecer que el valor de la CE es proporcional el valor de la concentración de las sales disueltas. Además, resulta importante destacar que debido a que las sales contenidas en el agua al incorporarse al suelo, aumentan la presión osmótica de la solución del suelo restringen la posibilidad de succión del agua por las plantas, con esto pudiendo impedir el abastecimiento de la misma.

Consiguiente, las sales pueden ocasionar problemas de toxicidad en las plantas, y a la vez la disminución del rendimiento de los cultivos, así como también obstrucciones en los sistemas de riego y, de manera más drástica, ocasionar la infertilidad del suelo siendo este proceso prácticamente irreversible (Fiat, 2008; Mena et al., 2017). En este sentido, y con la finalidad de que esta información sea lo más útil posible para los interesados, se muestra en la Tabla 8 la clasificación de la salinidad del agua para riego según su valor de conductividad eléctrica (Palacios y Aceves, 1994). Aquí es conveniente aclarar que, en los orígenes del sistema hidrográfico, las aguas tienen baja concentración electrolítica, de 100 a 480 $\mu\text{S/cm}$, sin embargo, cuando a estos cauces se vierten aguas urbano-industriales, éstas alcanzan valores hasta por arriba de 2,100 $\mu\text{S/cm}$.

En cuanto al elemento químico boro (B) cabe mencionar que es un importante micronutriente de difícil manejo debido a que su transporte de nutrientes es muy variante entre las especies vegetales con síntomas de deficiencia y toxicidad en un rango muy angosto. Además, algunos estudios indican que aguas de reciente percolación que han circulado a través de rocas de tipo volcánico tienen altas concentraciones de ácido bórico (H_3BO_3),

esto explica su origen a través de la meteorización. Lo anterior se confirmó con la cuantificación de altas concentraciones de aproximadamente de 1.9 mg/L de B que se obtuvieron en las aguas subterráneas de la Cuenca Alto Atoyac.

Tabla 8. Clasificación de la salinidad del agua para riego según su valor de conductividad eléctrica (CE)

Clasificación	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Baja salinidad	0-250
Salinidad media	250-750
Altamente salina	750-2,250
Muy altamente salina	2,250-5,000

Fuente: Palacios y Aceves (1994).

A colación y como es sabido, en esta zona de estudio, gran parte de la producción agrícola está dirigida al cultivo de lechuga, avena, calabaza y maíz, entre otros; estos son cultivos moderadamente sensibles, que toleran concentraciones de B entre 2 y 4 mg/L. Sorgo, tomate y alfalfa son cultivos tolerantes, que resisten concentraciones de B entre 4 y 6 mg/L (Ayers et al., 1976; Ayers y Westcot, 1985; Carrera-Villacrés et al., 2011). Por lo que en la Tabla 9 se muestran los valores de las concentraciones de B tolerantes correspondientes a los principales cultivos de la zona de la Cuenca Alto Atoyac.

Por otra parte, en términos de toxicidad de la salinidad del agua de riego, la más común proviene del cloruro. El cloruro no es adsorbido ni retenido por los suelos, por lo tanto, se transporta a través del agua, este es absorbido por el cultivo, se mueve en la corriente de transpiración y se acumula en las hojas. Si la concentración de cloruro en las hojas excede la tolerancia del cultivo, se desarrollan síntomas de daño como quemaduras de las hojas o sequedad del tejido de las hojas. Aunado a esto, las tolerancias de los cultivos al cloruro no están tan bien documentadas como las tolerancias de los cultivos a la salinidad, sin embargo, en este capítulo se plasman en la Tabla 9 un condensado de la literatura con información relevante de algunos cultivos de interés en la zona del Atoyac-Zahuapan referente a la

tolerancia al cloruro en el agua de riego. Cabe mencionar que, el incremento de estos elementos se debe a la agricultura intensiva y a la producción de ganado, además de los lodos provenientes de las aguas residuales; teniendo en consideración que altas concentraciones de fósforo, boro e índices de salinidad indican contaminación de aguas por efluentes urbano-industriales (Carrera-Villacrés et al., 2011).

Tabla 9. Valores de las concentraciones de Boro, Cloruro, Sodio y Conductividad eléctrica tolerantes correspondientes a los principales cultivos de la zona de la Cuenca Alto Atoyac

Cultivo	Valor máximo tolerantes			
	Boro [mg/L]	Cloruro [me/L]	Sodio [mg/L]	Conductividad eléctrica [dS/m]
Tomate	6.0	10	2.0	2.0
Alfalfa	6.0	20	6.0	2.0
Perejil	6.0	20	6.0	4.0
Sorgo	6.0	20	2.0	6.8
Maíz	4.0	20	1.0	1.7
Avena	4.0	-	2.0	1.7
Lechuga	4.0	10	2.0	1.25
Calabaza	4.0	2.0	1.2	-
Col	4.0	2.0	1.8	> 20
Rábano	2.0	2.0	1.2	-
Pepino	2.0	2.0	2.0	20
Frijol	1.0	1.0	1.6	-
Trigo	1.0	2.0	6.0	-
Cebada	1.0	6.0	8.0	20
Vid	< 1.0	2.0	1.5	20
Cebolla	< 1.0	2.0	1.2	

Fuente: Ayers et al. (1976); Ayers y Westcot (1985); Carrera-Villacrés et al. (2011).

En este contexto, y en atención a la población concerniente al sistema fluvial Atoyac-Zahuapan estudios recientes han reportado que las concentraciones de fósforo total (PT) en varios tramos del río Zahuapan están altamente relacionadas por

actividades agrícolas, urbanas e industriales a una concentración promedio de 52.9 mg/L, superando en algunos sitios el valor guía de 20 mg/L establecido por la norma mexicana (NOM-001-SEMARNAT, 1996; Mena et al., 2017).

Aunque el río Zahuapan carece de estudios recientes sobre concentraciones de nitrógeno, algunos resultados indican que las concentraciones de nitrógeno total (NT), nitrógeno total kjeldahl (NTK), nitrógeno orgánico (N_{org}) y el nitrógeno como amoníaco ($N-NH_3$) han alcanzado valores promedio de 11.50 mg/L, 10.13 mg/L, 3.65 mg/L y 7.60 mg/L, en el área cercana a la confluencia del Atoyac-Zahuapan (Muñoz-Nava et al., 2013), esta información se condensa en la Tabla 10.

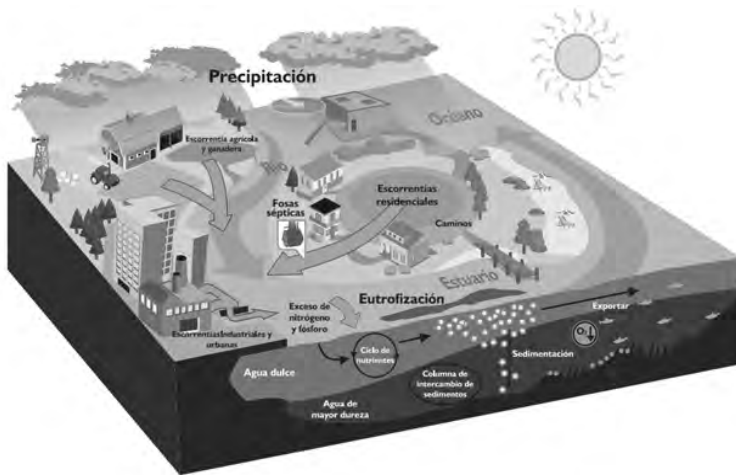
Tabla 10. Concentración de nitrógeno, fósforo, boro y sales cuantificadas en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan

Sustancia	Concentración cuantificada (mg/L)
Nitrógeno total (NT)	11.50
Fósforo (PT)	52.30
Boro	1.9
Amoníaco (NH_3)	1.21
Amonio (NH_4^+)	44.20
Nitrógeno kjeldahl total (TKN)	10.13
Nitrógeno orgánico (N_{org})	3.65
Nitrógeno como amoníaco ($N-NH_3$)	7.60
NO_3^-	0.45
NO_2^-	0.07
Fosfato	2.73
Ca^{2+}	102.00
Mg^{2+}	62.70
Na^+	50.60
K^+	15.20
HCO_3^-	378.00
Cl^-	33.00
SO_4^-	69.20

Fuente: Carrera-Villacrés et al. (2011); González-Pérez et al. (2019); Mora et al. (2021).

Con respecto a lo anteriormente planteado, parcialmente se puede concluir que los procesos de eutrofización (definidos como la adición excesiva de nutrientes inorgánicos, materia orgánica y limo) provocan un aumento correspondiente en la productividad biológica, tal como se muestra en la Figura 8 (Lee y Jones-Lee, 2005; Lin et al., 2021) y se están desarrollando en la zona baja de la Cuenca Alto Atoyac.

Figura 8. Esquema de la eutrofización (fertilización excesiva) como causante de deterioro ambiental



Fuente: Lee y Jones-Lee (2005); Lin et al. (2021).

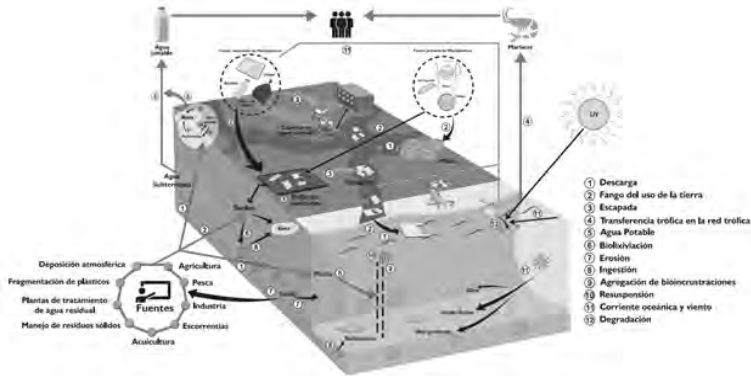
Estos procesos son peligrosos debido a su carácter irreversible, crecimiento excesivo de algas, acumulación de materia orgánica que no se descompone totalmente y podría provocar emanaciones con cierta toxicidad. Las posibles soluciones para evitar la eutrofización son el tratamiento de aguas residuales en la fuente, estanques de retención para detener los nutrientes antes de ingresar a la fuente de agua superficial o zonas de amortiguamiento entre las tierras agrícolas y las fuentes de agua abiertas.

Microplásticos

A partir de que los productos plásticos comenzaron a llegar al mercado a gran escala en la década de 1950, la producción mundial de plástico se incrementó de 0.5 millones de toneladas por año en 1960 a 348 millones de toneladas en 2017 (Wu et al., 2019) . Los productos plásticos, debido a su lenta degradación, se acumulan en el medio ambiente. Esta lenta degradación regularmente se da por medio de mecanismos de fragmentación de los productos plásticos hasta llegar a formar microplásticos (MP) con longitudes menores a $0.5 \mu\text{m}$. Estos mecanismos de fragmentación pueden ocurrir por medio procesos tales como: fotooxidación por luz ultravioleta, hidrólisis, fractura mecánica debido a abrasión de arena o turbulencia del agua o bioasimilación por microorganismos, entre otros. Por lo tanto, de estos procesos de fragmentación dependen las morfologías, dimensiones, densidades y propiedades fisicoquímicas de los MP; además, también del material del que está hecho el plástico (Wu et al., 2019).

Los principales polímeros que originan a los MP detectados en el medio ambiente se encuentran el Polietileno, Polipropileno, Poliestireno, Poliamida (nailon), Poliéster, Acrílico, Polioximetileno, Alcohol de polivinilo y el Cloruro de polivinilo, entre otros. Por lo cual, se consideran a los microplásticos como un peligro para el sistema ecológico y su presencia, particularmente en el agua, tiene un impacto adverso en la salud humana y en los ecosistemas. Una vez que estos contaminantes ingresan al agua, la vida acuática se alimenta de ellos y los microplásticos ingresan a la cadena alimentaria y causan graves peligros para la salud (Awasthi et al., 2020; Kutralam-Muniasamy et al., 2020; Oladoja y Unuabonah, 2021) (ver Figura 9).

Figura 9. Fuentes, transporte, acumulaciones y destino de los microplásticos en el medio ambiente



Fuente: Después de Wu et al. (2019).

Esto aunado a que, los MP en el medio ambiente también provienen de la liberación directa de productos que contienen MP, como gránulos que se utilizan para fabricar productos de plástico y microperlas de plástico como aditivo en productos de cuidado personal (limpiadores faciales y de manos, pasta de dientes y cosméticos) fragmentos de plásticos derivados de la degradación de productos plásticos más grandes (cuerdas, embalajes y ropa), y de las plantas de tratamiento de aguas residuales. En este sentido, los MP se han agrupado según sus formas como microperlas, nurdles (pellets), fibras, espuma y fragmentos (Wu et al., 2019), esto se ejemplifica en la Figura 10.

Figura 10. Categorías y fuentes de microplásticos en el medio ambiente



Fuente: Después de Wu et al. (2019).

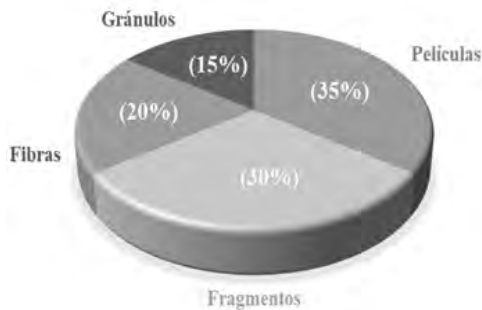
Por otro lado, el nivel de toxicidad de los MP para los organismos se deriva de su especiación fisicoquímica, del tamaño y morfología. En consecuencia, las formas dominantes de MP identificadas son las microfibras, provenientes principalmente de los textiles sintéticos, que debido a su naturaleza casi ingravida se pueden suspender en la atmósfera ser inhalado y crear posibles problemas de salud (Akanyange et al., 2021).

En cuanto a la detección de MP en ecosistemas de México permanece casi inexplorada. Sin embargo, recientes trabajos en el sistema fluvial Atoyac-Zahuapan determinaron la abundancia de MP como ítems por kg de muestra de peso seco, obteniendo valores de aproximadamente $1,633.34 \text{ ítems kg}^{-1}$ (peso en seco) (Shruti et al., 2019; Wu et al., 2019).

En este mismo estudio se observaron diferentes tipos de MP, incluyendo películas, fragmentos, fibras y gránulos y con

diferentes colores (ver Figura 11); y que es muy probable que las fuentes de fragmentos y material de película provengan de la descomposición de muchos productos plásticos, como bolsas de plástico, materiales de embalaje y recipientes de plástico. Las fibras fueron los segundos MP más abundantes encontrados en los sedimentos de la cuenca del río Atoyac. Su presencia se ha atribuido comúnmente a la liberación de fibras sintéticas de textiles y prendas durante el lavado

Figura 11. Tipos de Microplásticos en la cuenca del río Atoyac-Zahuapan, Puebla



Fuente: Después de Shruti et al. (2019); Wu et al. (2019).

Cabe resaltar que uno de los hallazgos en una de estas investigaciones se confirmó la presencia de varios metales (adsorbidos, adheridos o como aditivos), incluidos los principales (Al, Fe, Mg, Ca, Na, Si, Ti, S, Cl & P) y oligoelementos (Co, Pb, Zn, Ni, Cr y Ta) en la superficie de MP. Los metales que se encuentran en la superficie de los MP como Al, Fe, Mg, Ca, Na, Si, Ti y S se derivan de fuentes volcánicas y geológicas naturales. El Cr y el Ni tienen su origen en las industrias de galvanoplastia, donde se utilizan como agentes anticorrosivos y de las industrias de tintura de textiles situadas a lo largo de la cuenca del río. Asimismo, Pb y Zn están asociados principalmente a la actividad agrícola de esta zona (Shruti et al., 2019).

Conclusiones

El sistema fluvial Atoyac-Zahuapan presenta problemas medioambientales relacionados con la contaminación de agua, suelos, aire, erosión y deforestación; así como también esto se ha derivado en graves problemas de salud pública. Que sin duda alguna la mayor parte de ese deterioro ha sido provocado por las actividades antropogénicas cercanas al perímetro del acuífero, producto del mal manejo de residuos a lo largo de más de 40 años. Esta falta de planeación ambiental compromete la conservación de los recursos naturales de la región y, por consecuencia, el bienestar social. Por lo que es prioritario que la información generada con respecto a la problemática ambiental esté organizada, sistematizada y condensada para que se emplee como indicativo de partida para lograr la formulación de políticas públicas, programas de manejo y conservación ambiental, mucho más precisas por parte las autoridades correspondientes.

Referencias bibliográficas

- Acencio Gasca, I. J. (2016). *Metodología para la obtención de gastos en cuencas urbanas y semiurbanas, aplicado en localidades que aportan a la presa Manuel Ávila Camacho. Programa de Maestría y Doctorado En Ingeniería.* Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/11351>
- Akanyange, S. N., Lyu, X., Zhao, X., Li, X., Zhang, Y., Crittenden, J. C., Anning, C., Chen, T., Jiang, T. y Zhao, H. (2021). Does microplastic really represent a threat? A review of the atmospheric contamination sources and potential impacts. *Science of the Total Environment*, 777, 146,020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146020>
- Awasthi, A. K., Tan, Q. y Li, J. (2020). Biotechnological Potential for Microplastic Waste. *Trends in Biotechnology*, 38(11), 1,196-1,199. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.03.002>

- Ayers, R. S. FAO, R. (1976). *Calidad del agua para la agricultura*. FAO.
- Ayers, R. S. y Westcot, D. W. (1985). *Water Quality for Agriculture*. FAO of the UNITED NATIONS.
- Behera, M., Nayak, J., Banerjee, S., Chakraborty, S. y Tripathy, S. K. (2021). A review on the treatment of textile industry waste effluents towards the development of efficient mitigation strategy: An integrated system design approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105,277. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105277>
- Berger, P. (2019). *Desarrollo de un método para la detección y cuantificación del plaguicida glifosato en muestras de agua de San Simón Atzitzintla, Puebla*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Guias/Guias_Ev_Riesgos/Manual_Eval_Riesgos_Pyme/evaluacionriesgospyme.pdf
- Berkner, S., Konradi, S. y Schönfeld, J. (2014). Antibiotic resistance and the environment—there and back again. *EMBO Reports*. <https://doi.org/10.15252/embr.201438978>
- Berradi, M., Hsissou, R., Khudhair, M., Assouag, M., Cherkaoui, O., El Bachiri, A. y El Harfi, A. (2019). Textile finishing dyes and their impact on aquatic environs. *Heliyon*, 5(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02711>
- Betancourt, R. y Diaz, O. (2018). Los pesticidas: clasificación, necesidad de un manejo integrado y alternativas para reducir su consumo indebido: una revisión. *Revista Científica Agroecosistemas*, September, 14-30.
- Bonilla y Fernández, M. N. (2014). Concentraciones de metales pesados totales en aguas residuales vertidas a ecosistemas acuáticos por dos parques industriales en Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 02.
- Bonilla, M., Ayala, A., González, S., Santamaría, J. y Silva, S. (2007). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 “Valsequillo” para riego agrícola. *Revista*

Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa, 3(1), 29.

- Briffa, J., Sinagra, E. y Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
- Calidad, D. E. L. A. y Agua, D. E. L. (2020). *Calidad del agua agua superficial y subterránea. Indicadores de la calidad del agua superficial y subterránea*. Comisión Nacional Del Agua, CONAGUA.
- Cao, X. L. X., Wang, S., Bi, R., Tian, S., Huo, Y., Liu, J. J., Science, B., Tlili, I., Alkanhal, T. A., Korina, E., Stoilova, O., Manolova, N., Rashkov, I., Tissera, N. D., Wijesena, R. N., Sandaruwan, C. S., de Silva, R. M., de Alwis, A., de Silva, K. M. N., ... Gad, S. C. (2019). Photocatalytic activity of ZnO nanoparticle encapsulated poly(acrylonitrile) nanofibers. *Progress in Polymer Science*, 6(3), 1,079-1,087. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.10.035>
- Carrera-Villacrés, D. V., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-García, J., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C. y Becerril-Román, A. E. (2011). Boro, fosfatos e índices de salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 2(2), 5-21.
- Castresana, G. P., Flores, V. T., Reyes, L. L., Aldana, F. H., Vega, R. C., Perales, J. L. M., Suastegui, W. A. G., Fonseca, A. D. y Silva, A. H. (2018). Atoyac River pollution in the metropolitan area of Puebla, México. *Water (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/w10030267>
- Castro-González, N. P., Moreno-Rojas, R., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Orteg, A. y Tamariz-Flores, J. V. (2018). Heavy metals in milk from cows fed alfalfa produced in soils irrigated with wastewater in Puebla and Tlaxcala, Mexico. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 9(3), 466-485. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v9i3.4358>

- Castro-González, N. P., Moreno-Rojas, R., Calderón Sánchez, F., Moreno Ortega, A. y Juárez Meneses, M. (2017). 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 Surveillance*, 10(3), 200-207. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1316320>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (1997). *Normas Oficiales Mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997*. CONAGUA.
- Cotler, H. (2007). Delimitación de las Cuencas Hidrográficas de México a escala 1:250 000. *Inegi, Ine, Conagua*, 1-34.
- Davidson, C. J., Hannigan, J. H. y Bowen, S. E. (2021). Effects of inhaled combined Benzene, Toluene, Ethylbenzene, and Xylenes (BTEX): Toward an environmental exposure model. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 81(July 2020), 103,518. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103518>
- En P. & Ambientales, C. (2018). *Evaluación toxicológica del agua residual textil (proceso denim) vertida al río Atoyac*.
- En S., Subcuenca, L. A., Alto, D. E. L., En, B. y Puebla, T. Y. (2019). *Nivel de contaminación de metales y arsénico en aguas residuales y suelos en la subcuenca del alto balsas en tlaxcala y puebla, méxico*. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.06>
- Fiat (2008). *Manual de uso e interpretación de agua*.
- García de León Loza, A. (2018). Zonas Metropolitanas de Puebla-Tlaxcala: Crecimiento Poblacional y Actividad Manufacturera. *Agenda Pública Para El Desarrollo Regional, La Metropolización y La Sostenibilidad*, 156-175. http://ru.iiec.unam.mx/4304/1/2-Vol3_Parte1_Eje5_Cap3-038-García De Leon.pdf
- González-Pérez, E., Ortega-Escobar, H. M., Yáñez-Morales, M. J. y Rodríguez-Guillen, A. (2019). Diagnosis of indicators of physical-chemical quality of water in affluents of the Atoyac river. *Tecnología y Ciencias*

- Del Agua*, 10(1), 30-51. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2019-01-02>
- Gupta, P. K. (2018). Toxicity of Herbicides. *Veterinary Toxicology: Basic and Clinical Principles: Third Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811410-0.00044-1>
- Hafiz, S. y Jamil, S. (2021). *Antimicrobial resistance - A global threat*. ONU, Programa Para El Medio Ambiente. <https://doi.org/10.3126/ijim.v1i2.7405>
- Hernández-Ramírez, A. G., Martínez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, P. F., Mendoza-Pérez, J. A., Tabla-Hernández, J., Escobedo-Urías, D. C., Jonathan, M. P. y Sujitha, S. B. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of the Total Environment*, 669, 1,019-1,032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>
- Hernández, J. H. C. (2021). Historical origin of water pollution and legal analysis of the Atoyac river. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 12(1), 1-36. <https://doi.org/10.24850/J-TYCA-2021-01-05>
- Inclán, B., Alberto, L., Chávez, S., Javier, J., Dávila, I., Luis, J., Javier Puga Martínez y Cecilia, A. (2015). *Evaluación Toxicológica Del Río Atoyac, Pue., Y Su Relación Con Los Parámetros Fisicoquímicos*. <http://www.amica.com.mx/issn/archivos/183.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2019). *Diagnóstico sobre la contaminación por plaguicidas en agua superficial, agua subterránea y suelo 2019*. 4209, 37.
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) (2021). Censo de población y vivienda. *Censo de Poblacion y Vivienda*, 1-3. <http://censo2020.mx/>
- Isaac-Olivé, K. y Navarro-Frómata, A. E. (2019). Detection of Pharmaceuticals in the Environment. In *Handbook of Environmental Chemistry*. https://doi.org/10.1007/698_2017_165

- José, L. (2017). *Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas*, 3(9), 10-23.
- Juárez-Santacruz, L., García-Nieto, E., Costilla-Salazar, R., García-Gallegos, E., Coronel-Olivares, C., Gómez-Camarillo, M. y Gaytán-Oyarzún, J. (2013). Assessment of the Genotoxic Potential of Sediments Contaminated with POPs and Agricultural Soils Using *Vicia faba* Micronucleus Assay. *Soil and Sediment Contamination*, 22(3), 288-300. <https://doi.org/10.1080/015320383.2013.726293>
- Kondor, A. C., Molnár, É., Vancsik, A., Filep, T., Szeberényi, J., Szabó, L., Maász, G., Pirger, Z., Weiperth, A., Ferincz, Á., Staszny, Á., Dobosy, P., Horváthné Kiss, K., Jakab, G. y Szalai, Z. (2021). Occurrence and health risk assessment of pharmaceutically active compounds in riverbank filtrated drinking water. *Journal of Water Process Engineering*, 41(January). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102039>
- Kumar, V., Parihar, R. D., Sharma, A., Bakshi, P., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., Gyasi-Agyei, Y. y Rodrigo-Comino, J. (2019). Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses. *Chemosphere*, 236, 124,364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364>
- Kutralam-Muniasamy, G., Pérez-Guevara, F., Elizalde-Martínez, I. y Shruti, V. C. (2020). Review of current trends, advances and analytical challenges for microplastics contamination in Latin America. *Environmental Pollution*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115463>
- Landsat, N. (2019). *Cuenca hidrológica Alto Atoyac Humedales Informe técnico USGS/NASA Landsat*. www.inegi.org.mx
- Lee, G. F. y Jones-Lee, A. (2005). Eutrophication (Excessive Fertilization). *Water Encyclopedia*. <https://doi.org/10.1002/047147844x.sw1606>

- Lellis, B., Fávoro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A. y Polonio, J. C. (2019). Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>
- Lin, S. S., Shen, S. L., Zhou, A. y Lyu, H. M. (2021). Assessment and management of lake eutrophication: A case study in Lake Erhai, China. *Science of the Total Environment*, 751, 141,618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141618>
- Mani, S., Chowdhary, P. y Bharagava, R. N. (2018). Textile wastewater dyes: Toxicity profile and treatment approaches. In *Emerging and Eco-Friendly Approaches for Waste Management*. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8669-4_11
- Mena Mejía, I., Bustamante González, Á., Vargas López, S., Olvera Hernández, J. I. y Méndez Espinoza, J. A. (2017). Evaluación de la condición ecológica del río Zahuapan. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1), 7-19. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.01>
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P. y Mahlknecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of the Total Environment*, 782, 146,788. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Muñoz-Nava, H., Suárez-Sánchez, J., Vera-Reyes, A., Baumann, J., Carreón-Coca, M. F. y Montealegre-Muñoz, R. G. (2013). Relación entre el nitrógeno y las microcuencas del río Zahuapan, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(4), 47-61.
- Nawaz, T. y Sengupta, S. (2018). Chapter 4 - Contaminants of Emerging Concern: Occurrence, Fate, and Remediation. *Advances in Water Purification Techniques: Meeting the Needs of Developed and Developing Countries*.

- Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00004-1>
- No. 10 /2017 RECOMENDACIÓN (2017). CNDH. Recomendación no. 10 /2017 emitida por la Comisión Nacional de los Derechos Humanos sobre la violación a los derechos humanos a un medio ambiente sano, saneamiento del agua y acceso a la información, en relación con la contaminación de los ríos Atoyac. *Comisión Nacional de Los Derechos Humanos*, 56, 211. https://www.cndh.org.xn--mxalldocrecomendacionresrec_201_010-cc6uddp
- Oladoja, N. A. y Unuabonah, I. E. (2021). The pathways of microplastics contamination in raw and drinking water. *Journal of Water Process Engineering*, 41(December 2020), 102,073. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102073>
- Palacios, O. y Aceves, E. (1994). *Instructivo para el muestreo registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola*. Colegio de Postgraduados.
- Ramírez Varela, A. y López Santos, J. D. (2018). ¡Luchamos por un Atoyac con Vida! La lucha contra la contaminación del Río Atoyac y los daños a la salud que origina en el sur de Tlaxcala, México. *Bajo El Volcán*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28659183007>
- Rodríguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Jonathan, M. P. y Martínez-Tavera, E. (2018). Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148(November 2017), 1,020-1,033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.068>
- Sagrario, P., Velázquez, H., Por, D., Tania, D. y Sepúlveda, L. V. (2020). Evaluación de la contaminación generada por el agua residual textil vertida al río Atoyac, Tlaxcala. *Rpositorio Digital, BUAP*. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/10264/20201215103103-4770-T.pdf?sequence=2>

- Sánchez, M., Áviles, M., Moeller, G., González, L., Sánchez, M., Sánchez, F. y Ramírez, N. (2012). *Desarrollo de metodologías de laboratorio para la detección de contaminantes emergentes y su identificación en cuerpos de agua (agua sedimento) y en aguas residuales (en influente, efluente y lodos de PTAR)*.
- Sandoval, A. M., Pulido-Flores, G., Monks, S., Gordillo Martínez, A. J. y Villegas Villarreal, E. C. (2009). Evaluación fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Evaluación Fisicoquímica, Microbiológica Y Toxicológica De La Degradación Ambiental Del Río Atoyac, México*, 34, 880-887.
- Schroeder, H. A. y Mitchener, M. (1971). Scandium, chromium(VI), gallium, yttrium, rhodium, palladium, indium in mice: effects on growth and life span. *The Journal of Nutrition*, 101(10), 1,431-1,437. <https://doi.org/10.1093/jn/101.10.1431>
- Shankar, P. (2016). Book review: Tackling drug-resistant infections globally. *Archives of Pharmacy Practice*, 7(3), 110. <https://doi.org/10.4103/2045-080x.186181>
- Sharma, J., Sharma, S. y Soni, V. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. *Regional Studies in Marine Science*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101802>
- Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodríguez-Espinosa, P. F. y Rodríguez-González, F. (2019). Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *Science of the Total Environment*, 654, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054>
- Syafrudin, M., Kristanti, R. A., Yuniarto, A., Hadibarata, T. y Rhee, J. (2021). *Pesticides in Drinking Water — A Review*.
- Weber, E. J. y Stickney, V. C. (1993). Hydrolysis kinetics of Reactive Blue 19-Vinyl Sulfone. *Water Research*, 27(1), 63-67. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(93\)90195-N](https://doi.org/10.1016/0043-1354(93)90195-N)
- Wu, P., Huang, J., Zheng, Y., Yang, Y., Zhang, Y., He, F., Chen, H., Quan, G., Yan, J., Li, T. y Gao, B. (2019).

Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 184(April), 109,612. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109612>

Zapór, L., Miranowicz-Dzierzawska, K., Skowroń, J. y Wojewódzka, M. (2015). The toxic effect of zirconium oxide nanoparticles in ovary and testis cells. *Toxicology Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.08.592>

Zheng, S., Chen, B., Qiu, X., Chen, M., Ma, Z. y Yu, X. (2016). Distribution and risk assessment of 82 pesticides in Jiulong River and estuary in South China. *Chemosphere*, 144, 1,177-1,192. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.050>



CAPÍTULO 5. DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD DEL SUELO Y APORTE NUTRIMENTAL DE LAS AGUAS DEL RÍO ATOYAC EN EL EJIDO SAN MATEO AYECAC, TLAXCALA

Juan José Castellón Gómez¹

Introducción

La agricultura enfrenta problemas que dificultan la producción de alimentos; entre otros, la disponibilidad y la calidad del agua. La respuesta de los cultivos en la agricultura es el resultado de diversos factores que se inician con el diagnóstico de la fertilidad del suelo y de las características del agua de riego. Esto enfocado a mantener y conservar la salud y calidad del suelo a través de sus componentes físico, químico y biológico, lo cual está estrechamente relacionado con el manejo de la nutrición de cultivos.

El uso de aguas residuales, en muchos de los casos, es una alternativa que permite la conservación del agua, el reciclaje de nutrientes, una disminución en el uso de fertilizantes y la disposición de una fuente de agua para los productores. El conocimiento de la calidad del agua definida por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga es un parámetro de vital importancia para su uso en la agricultura. Sin embargo, diversos estudios sobre el uso agrícola de aguas residuales han mostrado la presencia de problemas ambientales

¹ Profesor-investigador. Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala-Tecnológico de México, correo-e: juanjose.cg@altiplano.tecm.mx

con implicaciones en la salud humana, la contaminación de suelos y de cultivos.

La comunidad de San Mateo Ayecac, Tlaxcala; es una de tantas comunidades agrícolas que dependen en gran medida del agua del río Atoyac para riego de sus cultivos que incluye diversas hortalizas (haba, lechuga, cilantro, col, brócoli, espinacas, etcétera) y algunos granos básicos (maíz, frijol). Dichas aguas son utilizadas sin tratamiento ni una caracterización física y química para evaluar su calidad agronómica y el uso seguro en la producción de cultivos. En ese sentido, se propuso el presente estudio con la finalidad de evaluar la calidad del agua del río Atoyac utilizada en el riego de cultivos, con base en el aporte nutrimental y la acumulación de algunos contaminantes en el suelo a fin de generar recomendaciones de fertilización para cultivos de interés local.

Fundamentación teórico-conceptual

El río Atoyac pertenece a la subcuenca del Alto Atoyac. Se origina de los deshielos del volcán Iztaccíhuatl en el estado de Puebla, a una altitud de 3250 m; tiene una longitud de 84.97 km. En su descenso la corriente pasa por los estados de Puebla y Tlaxcala (Martínez et al., 2017). Además, este río se encuentra entre las corrientes más contaminadas del país (IMTA, 2005); a pesar de ello, las aguas se utilizan para el riego de cultivos sin el tratamiento adecuado en las zonas agrícolas adyacentes al río como es el ejido de San Mateo Ayecac, del municipio de Tepetitla de Lardizábal en Tlaxcala. Aunque se menciona que las aguas residuales pueden ser consideradas como un recurso alternativo ante la escasez del recurso hídrico, con posibilidades de aprovecharse en la agricultura dada la gran demanda de agua en este sector (Cisneros et al., 2001), es importante señalar que dicho planteamiento se refiere al uso de aguas tratadas o regeneradas.

Una alternativa para remediar en parte la falta de agua, es aprovechar el agua residual para riego agrícola, generada tanto por la población urbana, como por las industrias. Sin embargo, son pocos los estudios relacionados con la calidad sanitaria y

productividad agrícola de tales recursos hídricos. En México, es escasa la investigación sobre el aprovechamiento de los nutrimentos, la evaluación de la calidad sanitaria en ciertos cultivos, y las propiedades físicas y químicas de suelo debido al riego con aguas residuales (Rascón et al., 2005). La reutilización de las aguas residuales municipales ofrece múltiples beneficios para la agricultura si se adoptan medidas para disminuir el riesgo en la salud y el medio ambiente. No solo se trata de una fuente adicional de agua para riego, sino que aporta nutrimentos que son aprovechados por las plantas para su crecimiento y desarrollo (Mateo y González, 2017).

Méndez et al. (2006) afirman que el uso de aguas residuales en la agricultura en Cuba es una alternativa para producir cultivos, siempre y cuando no existan afectaciones a los frutos cosechados, al suelo y al medio ambiente. Dichos investigadores estudiaron el efecto del riego con aguas residuales en cultivos de zanahoria y rábano donde encontraron que el contenido de materia orgánica y fósforo se incrementaron, el suelo no presentó problemas por los contenidos de sodio y los valores de pH, y el entorno tampoco presentó afectaciones.

La fertilidad del suelo

La contaminación del suelo ocurre cuando la concentración de un químico o sustancia es más alta de la que ocurriría naturalmente sin que necesariamente se cause un daño. Sin embargo, una de las dificultades es el establecimiento de concentraciones normales de contaminantes en el suelo a través de las aguas residuales (FAO, 2015). Con base en evidencia científica, la contaminación del suelo puede degradar gravemente los principales servicios a los ecosistemas provistos por el suelo. La contaminación del suelo afecta la seguridad alimentaria al reducir los rendimientos agrícolas debido a los niveles tóxicos de los contaminantes y al ocasionar que las cosechas producidas en suelos contaminados sean peligrosas para el consumo de animales y humanos (Rodríguez et al., 2019).

Las principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo son los químicos usados o producidos como derivados de

actividades industriales (metales pesados, solventes, efluentes), desechos domésticos y municipales (surfactantes, farmacéuticos, fosfatos), incluyendo las aguas residuales, los agroquímicos (pesticidas, fertilizantes) y los productos derivados del petróleo.

El exceso de metales pesados en el suelo, como arsénico, cadmio, plomo y mercurio, también puede alterar el metabolismo de las plantas y disminuir la productividad de los cultivos, ejerciendo presión en última instancia sobre el suelo. Una vez que los metales penetran en los tejidos vegetales, pueden interferir con varios procesos metabólicos, reduciendo el crecimiento de la planta, causando toxicidad y, por último, la muerte de la misma. Los principales efectos que se han observado son el decremento en índices de germinación, daño por oxidación, menor elongación de raíces y brotes y alteraciones en el metabolismo de azúcares y proteínas (Chen, Li y Shen, 2004).

La calidad del agua de riego

Letey et al. (2003) definen la calidad del agua es definida como “las propiedades químicas, físicas y biológicas que afectan su uso”. De acuerdo con lo anterior, la calidad del agua no puede ser definida hasta que su uso sea especificado; en otras palabras, es la relación entre la calidad del agua y las necesidades del usuario (Ayers y Westcot, 1985). La calidad de las aguas residuales puede variar significativamente según su origen (doméstico, industrial, etcétera), y también según el tipo y cantidad de contaminantes presentes en ellas. Desde un punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y cantidad de sales presentes en ella y su efecto sobre el suelo y el desarrollo y crecimiento de los cultivos. El uso de agua salina en la agricultura altera las características químicas de los suelos.

Ante la escasez de aguas de alta calidad para la agricultura, una de las propuestas para lograrlo han sido las aguas residuales (Jaramillo y Restrepo, 2017). La implementación de sistemas integrados de tratamiento y el uso de aguas residuales domésticas deberá considerar la calidad del agua en sus tres dimensiones: sanitaria, agronómica y ambiental. La calidad agronómica estará relacionada con las concentraciones de nutrientes (nitrógeno,

fósforo, potasio y oligoelementos), así como de aquellos elementos limitantes o tóxicos para la agricultura, como la salinidad y cantidades excesivas de boro, metales pesados y otros (CEPIS-OPS-OMS, 2007). El aprovechamiento de las aguas residuales con fines de reúso en agricultura supone poner especial atención a la calidad del agua, tanto desde el punto de vista agronómico, como desde el punto de vista microbiológico.

Por sus características estructurales, el agua disuelve y mantiene en suspensión un gran número de sustancias, algunas de las cuales son potencialmente tóxicas para las plantas, por lo que su acumulación (ya sea o no directamente tóxica) genera problemas en los vegetales por efecto salino (Hazem-Kalaji y Pietkiewicz, 1993). En este sentido, uno de los factores más importantes en la producción de cultivos después de la disponibilidad del agua, es su calidad (Bojórquez, 2008), la cual se puede dividir en química y agronómica. La calidad química del agua, que puede tener un uso muy amplio, está dada por las cantidades de sales y la proporción de diferentes iones que ésta tiene en solución; su conocimiento permite determinar si se puede recomendar con fines domésticos, industriales, pecuarios y/o agrícolas. El problema frecuente en el caso del riego de cultivos es que generalmente no se especifica con qué calidad química se debe utilizar el agua, sino que solamente se da importancia a la calidad agronómica determinada por: cultivo a regar, condiciones climatológicas, métodos de riego, condiciones de drenaje del suelo y prácticas de manejo de agua, suelo y plantas (Aceves, 2011).

La calidad del agua para riego también está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga. Por lo tanto, esta calidad es una consideración fundamental para la investigación de las condiciones de salinidad o contenido de sodio intercambiable en cualquier zona de riego. Las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son: 1) la concentración total de sales solubles; 2) la concentración relativa de sodio con respecto a otros cationes; 3) la concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos y 4) bajo ciertas condiciones, la concentración

de bicarbonatos con relación a la concentración de calcio más magnesio que determinan su dureza (Richards, 1985).

Desde un punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y la cantidad de sales presentes en ella y su efecto sobre el suelo y el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Una alta concentración de sodio y cloro puede causar desórdenes nutricionales y toxicidad. Los principales iones que se evalúan en el agua son calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{+2}), sodio (Na^+), potasio (K^+), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) (Richards, 1954; Ayers y Wescot, 1985; Rhoades et al., 1992; Boman et al., 2002). Solamente en el caso de que exista evidencia de que el agua residual que se va a aprovechar tiene metales pesados, se deberá solicitar su determinación específica o con base en el listado que marca la normatividad vigente, considerando los metales más relevantes por sus efectos sobre la salud humana: arsénico, cadmio, cianuros, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc (Aceves, 2011).

En general, las aguas residuales contienen cantidades sustanciales de nutrimentos como N, P y K que pueden promover el crecimiento y el rendimiento de las plantas y reducir la demanda de fertilizantes químicos (Jung et al., 2014). Además de contener importantes micronutrientes como Fe y Zn (Pereira et al., 2012). Por lo tanto, el uso cuidadoso de aguas residuales puede reducir la aplicación de fertilizantes y por ende, costos ambientales y económicos, además de disminuir el contenido de elementos tóxicos como metales pesados, que causan problemas para la producción agrícola. La calidad del agua de riego sea residual cruda o tratada o agua de primer uso, primero desde el punto de vista agronómico debe ser evaluada considerando salinidad, sodicidad y toxicidad.

Para evaluar la presencia de sales en el agua de riego se utiliza la conductividad eléctrica (CE), mientras que la sodicidad se cuantifica utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS). La toxicidad del agua de riego se evalúa utilizando la determinación de los iones cloro, boro y sodio, ya que muchos cultivos son sensibles a dichos elementos (Cisneros y Saucedo, 2016; IMTA y MMAyA, 2018).

Uso de aguas residuales para la agricultura

La agricultura representa alrededor del 70% del uso mundial de agua, principalmente para la producción de alimentos y fibras y para el procesado de productos agrícolas. Cuando las lluvias son insuficientes para mantener los cultivos, el riego se hace necesario y aumenta el costo de las operaciones agrícolas. La falta de recursos hídricos convencionales provenientes de acuíferos, ríos y lagos ha llevado al creciente reciclaje de las aguas residuales domésticas y municipales para el riego (Wimpenny et al., 2013).

En la actualidad, la agricultura atraviesa por problemas que dificultan la producción de alimentos, porque la disponibilidad de agua se ha convertido en un factor limitante, en especial en áreas pobres del mundo afectadas por la falta de agua (Toledo, 2002). Existen varias razones que justifican el uso de aguas residuales en la agricultura. Win et al. (2002) señalan que las ventajas directas en los sitios sometidos a este tipo de riego son la conservación del agua, el reciclaje de nutrimentos, la no dependencia de fertilizantes y la disposición de un abastecimiento de agua confiable para los productores, particularmente en áreas secas de ingreso bajo.

El principal uso del agua residual en México es el agrícola. A pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial de impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura, como son: salinización de los suelos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, fijación y migración de contaminantes en suelos y plantas, y su eventual impacto por consumo de alimentos por parte del ser humano (CONAGUA, 2006).

En las áreas que sufren la escasez de agua, o en las épocas de sequía, el uso de aguas no convencionales, tales como los efluentes urbanos tratados, son una opción cada vez más relevante para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos y alcanzar un mejor equilibrio entre el suministro y la demanda de agua (Mateo et al., 2017). La reutilización de las aguas residuales municipales ofrece múltiples beneficios para la agricultura si se adoptan medidas de mitigación de riesgo para la salud y el

medio ambiente. No solo supone una fuente adicional de agua para irrigación, sino que incluye valiosos nutrientes que son aprovechados por las plantas y favorecen su desarrollo (Mateo et al., 2017).

El uso de aguas residuales en la agricultura puede aumentar el ingreso de materia orgánica y nutrientes a los suelos cultivados, lo cual contribuye a mantener e incrementar la fertilidad del mismo; pero también puede traer efectos ambientales nocivos que deterioran la calidad del suelo y del agua. La entrada del lodo de aguas residuales por varios años puede influenciar las características químicas y de fertilidad del suelo (Soler et al., 2002). Los materiales orgánicos y minerales que se encuentran suspendidos en las aguas no dañan a los cultivos; pero si los pueden beneficiar; el problema real es que la alta carga orgánica de las aguas residuales suele ir acompañada de contaminantes biológicos y químicos (Ortega y Orellana, 2007).

Las aguas residuales poseen una composición variada dependiendo de la actividad y uso que les dio origen y, por lo tanto, las concentraciones de contaminantes presentes también varían. Con todo esto, de manera general se puede decir que las aguas residuales contienen materia orgánica, organismos patógenos, grasas y aceites, nutrientes, contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos y minerales disueltos. Por su composición, las aguas residuales pueden reducir o incluso eliminar la necesidad de fertilizantes, mediante el riego con estas aguas. Lo anterior se apoya en resultados de investigaciones realizadas por Méndez et al. (2006), quienes señalan que el uso de estas aguas es una alternativa para la producción de cultivos, por los altos rendimientos agrícolas que se obtienen, dado al valor fertilizante de estas aguas residuales, los contenidos de materia orgánica y fósforo.

Asimismo, el contenido en nutrimentos en estas aguas (nitrógeno, fósforo, potasio y otros) puede contribuir a aumentar el rendimiento de los cultivos. Así, por ejemplo, considerando una concentración media de nitrógeno (N) y fósforo (P) en las aguas residuales de 40 y 8 mg.L⁻¹ respectivamente y una dotación de riego moderada de 8,000 m³/ha/año las dosis de fertilización que resultan son de 320 kg.ha⁻¹ de N y 64 kg.ha⁻¹ P, cantidades

más que suficientes para satisfacer las necesidades de la mayor parte de los cultivos (FAO, 2012).

Con base en el trabajo realizado por Guadarrama y Galván (2015) en suelos regados con agua residuales del Distrito de Riego 028 de Tulancingo, Hgo., se observaron valores de $\text{pH} = 7.87$, $\text{CE} = 0.11 \text{ dS.m}^{-1}$, $\text{M.O.} = 0.57 \%$ los cuales son muy bajos considerando los parámetros normales para un suelo; sin embargo, el contenido de cationes intercambiables fueron del orden de $\text{Ca} = 5338$, $\text{Mg} = 979.5$, $\text{K} = 2322$ y $\text{Na} = 423.2$ todo en ppm; los cuales se encuentran por encima de los niveles de referencia para aguas de uso agrícola .

El uso de aguas residuales presenta beneficios asociados al mejoramiento de la fertilidad de los suelos agrícolas por el aporte de materia orgánica, macronutrientes (N, P y K) y oligoelementos, como Na y Cl, permitiendo reducir, y en algunos casos eliminar, la necesidad del uso de fertilizantes químicos y trayendo beneficios económicos al sector (Hoek et al., 2002; como se citaron en Medeiros et al., 2005).

Las concentraciones totales de nutrimentos en las aguas residuales sin tratar suelen variar entre 10 y 100 mg L^{-1} (nitrógeno), 5-25 mg L^{-1} (fosforo) y 10 y 40 mg L^{-1} (potasio). Las aguas tratadas contendrán normalmente menos nitrógeno y fósforo, pero aproximadamente la misma cantidad de potasio, según sea el proceso de tratamiento empleado (Duncan y Cairncross, 1990).

Metodología

Ubicación del sitio de estudio

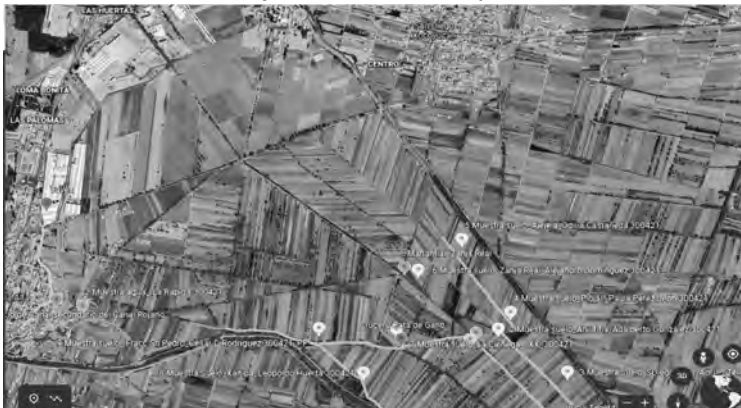
La localidad de San Mateo Ayecac pertenece al municipio de Tepetitla de Lardizábal del estado de Tlaxcala y se ubica entre las coordenadas geográficas $19^{\circ} 16' 45'' \text{ N}$ y $98^{\circ} 23' 42'' \text{ W}$, tiene una altitud de 2,220 m, colinda al norte con la comunidad de Villa Alta, al sur con el estado de Puebla, al oriente con la cabecera municipal (INEGI, 2005). La comunidad cuenta con 137 ejidatarios con una superficie de 165 ha en la organización

ejidal y una ampliación (Fracción San Pedro) de 45 ha, lugares donde se llevó a cabo el estudio de análisis de agua y suelo.

Muestreo de suelo y agua

En la Figura 1, se muestran los sitios de muestreo para suelo y agua. Las muestras de suelo se separaron con base a la textura determinada al tacto (franco arenoso y franco arcilloso), agrupando las muestras en dos secciones: Podridero con 6 muestras y Fracción San Pedro con 3 muestras; sin embargo, dichas muestras se manejaron como repeticiones con la finalidad de mejorar la precisión de los datos en el estudio.

Figura 1. Croquis de los sitios de muestreo de suelos y aguas del ejido San Mateo Ayecac



Fuente: Proyección cartográfica INEGI Landsat/Copernicus en Google Earth (septiembre 2021).

Determinación de parámetros químicos del suelo y agua

Determinación de la calidad del agua

Las aguas residuales analizadas en el presente estudio corresponden a tres sitios de los canales Rojano, La Rápida y Ajejela que son usados para el riego de hortalizas y granos básicos en el Ejido San Mateo Ayecac. El muestreo de agua

para la determinación de los parámetros evaluados se realizó por triplicado en botellas de plástico de un litro de capacidad previamente lavadas con agua desionizada, las cuales se sellaron herméticamente y se pusieron en la sombra para evitar reacciones posteriores que alterarán la composición química de la misma. El muestreo de agua se realizó en mayo de 2021, tomando las muestras directamente del flujo de los canales mencionados. En la Tabla 1, se presentan los niveles de referencia para medir el grado de restricción del agua de riego para su uso en la agricultura y el nivel de peligro de daño cuando se aplica el agua al suelo y la descripción del cálculo de dichos parámetros.

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua de riego para uso agrícola

Parámetro	Unidad	Grado de restricción		
		Ninguno	Leve a moderado	Severo
Salinidad				
Conductividad eléctrica	dS.m ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Sólidos disueltos totales	mg.L ⁻¹	< 450	450-2000	> 2000
Salinidad efectiva	meq.L ⁻¹	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
Salinidad potencial	meq.L ⁻¹	< 3.0	3.0-15.0	>15.0
Sodicidad				
Carbonato de sodio residual	meq.L ⁻¹	< 1.25	1.25-2.5	>2.5
Relación de adsorción de sodio	meq.L ⁻¹	< 3.0	3.0-9.0	> 9.0
Efecto de iones específicos				
Sodio	meq.L ⁻¹	< 5.0	5.0-10.0	> 10.0
Bicarbonatos	meq.L ⁻¹	< 1.5	1.5-8.5	> 8.5
Cloruros	meq.L ⁻¹	< 4.0	4.0-10.0	> 10.0
Boro	mg.L ⁻¹	< 0.7	0.7-3.0	> 3.0
Hierro	mg.L ⁻¹	< 0.1	0.1-1.5	> 1.5

Fuente: Castellanos (2000).

De acuerdo con Aceves (2011), y Aguilera *et al.* (1986), se han generado tres criterios para juzgar la conveniencia o limitación

del empleo del agua con fines de riego, el contenido de sales solubles, el efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo y el contenido de elementos tóxicos para las plantas, para lo cual se han definido índices cuantitativos para su medición, algunos de los más usuales son los siguientes.

Salinidad efectiva (SE)

Esta da una estimación del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego al pasar a formar parte de la solución del suelo, pues considera la precipitación posterior de las sales menos solubles (carbonatos de calcio y magnesio, así como sulfato de calcio) las cuales dejan de participar en la elevación de la presión osmótica de la solución del suelo. Este proceso es más notable cuando las aguas tienen un alto contenido de carbonatos y bicarbonatos. El cálculo de la salinidad efectiva se realizó siguiendo los siguientes parámetros y reglas de decisión:

1. Si $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$

Entonces $SE = \Sigma \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$

2. Si $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$ pero $Ca > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

Entonces $SE = \Sigma \text{cationes} - Ca^{2+}$

3. Si $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ pero $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

Entonces $SE = \Sigma \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

4. Si $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

Entonces $SE = \Sigma \text{cationes} - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

Nota: Si la $\Sigma \text{cationes} < \Sigma \text{aniones}$ deberá emplearse esta última en lugar de la $\Sigma \text{cationes}$.

Salinidad potencial (SP)

Cuando la humedad aprovechable de un suelo es menor al 50 %, las últimas sales que quedan en solución son cloruros y sulfatos. La salinidad potencial es un índice para estimar el peligro de estas y que por consiguiente aumentan la presión osmótica. El índice se calcula con la siguiente fórmula: $SP = Cl + \frac{1}{2} SO_4^{2-}$, las unidades se expresan en $meq.L^{-1}$.

Carbonato de sodio residual (CSR)

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el de Ca+Mg, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en solución, aun después de que han precipitado los carbonatos de calcio y magnesio. La concentración total y relativa de sodio puede ser suficiente para desplazar al Ca^{2+} y Mg^{2+} del complejo de intercambio, produciéndose la defloculación del suelo. Este índice se calcula de la siguiente manera: $\text{CSR} = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$. Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor del CSR puede suponerse igual a cero.

Relación de adsorción de sodio (RAS)

El sodio en el agua de riego propicia la dispersión de los coloides una vez que entra en contacto con el suelo y desplaza los cationes divalentes Ca^{++} y Mg^{++} , disminuyendo con ello la facilidad del suelo para conducir agua y oxígeno en el perfil. La sodicidad se expresa como la presencia relativa de Na^+ con respecto a los cationes Ca^{++} y Mg^{++} . La RAS se expresa de la siguiente manera:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

Los bicarbonatos presentes en el agua pueden precipitar el calcio, incrementándose el efecto negativo del sodio en el suelo. Por lo tanto, se requiere considerar además de la concentración de sodio, calcio y magnesio, los bicarbonatos presentes en el agua y este valor se ha denominado RAS ajustada.

Diagnóstico de la fertilidad del suelo

Se realizó un muestreo de suelo considerando variaciones espaciales en cuanto a textura estimada al tacto, determinando con esto zonas homogéneas. Se tomaron nueve muestras compuestas (ver Figura 1) utilizando la metodología propuesta

por FERTILAB (2021). Las muestras fueron tomadas a una profundidad de 0-30 cm, que es donde se presenta la mayor actividad radical de los cultivos en la mayoría de las hortalizas y granos básicos. Posteriormente, las muestras se agruparon en dos sectores que corresponden a las secciones del ejido de San Mateo Ayecac; sin embargo, solo se obtuvo la media aritmética presentando un solo valor para cada parámetro.

La determinación de parámetros para evaluar la fertilidad del suelo es la indicada por la NOM-021 SEMARNAT, 2000 (SEMARNAT, 2002). El pH con potenciómetro relación suelo-agua 1:2; Conductividad eléctrica (CE) puente de conductividad en el extracto de pasta saturada; Materia orgánica (MO) Walkley y Black; Nitrógeno (N) extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor; Fósforo (P) método Bray P-1; Potasio (K) y Sodio (Na) extraído por acetato de amonio 1.0 N pH=7.0 relación 1:2 y determinado por espectrometría de emisión de flama; Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) extraído en acetato de amonio 1N, pH 7.0 relación 1:2 y determinado por espectrometría de absorción atómica; Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn), extraídos con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrometría de absorción atómica; Boro extraído con CaCl_2 1.0 M Fotocolorimetría de azometina-H; Cloruros (Cl^-), Bicarbonatos (HCO_3^-) y Sulfatos, determinados los dos primeros por titulación volumétrica y el último por turbidimetría.

Resultados y discusión

Análisis de agua

Con la finalidad de dar una idea del contenido de sales útiles en la nutrición de las plantas que aportan las aguas residuales utilizadas para riego en cultivos hortícolas y granos básicos en la zona de estudio en San Mateo Ayecac en el estado de Tlaxcala, en la Tabla 2, se presentan los valores de nutrimentos obtenidos en el análisis químico del agua muestreada en el presente estudio; donde se puede notar el aporte de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y SO_4^{2-} lo que repercute en un ahorro en el uso de fertilizantes cuando se usa el

agua para riego. El agua residual utilizada en el riego por unidad de superficie muestra que se aportan calcio (100 kg), potasio (98 kg), magnesio (98 kg) y sulfatos (6 kg); pero el aporte de nitratos y fósforo es nulo.

Se observa que la mayoría de los iones considerados para evaluar la calidad del agua son bajos, lo que representa un mínimo riesgo de salinización del suelo cuando se usan para riego. El Na^+ que es un elemento que representa un riesgo cuando se encuentra por encima de 5 meq.L^{-1} , en este estudio presentó un nivel bajo (1.87 meq.L^{-1}). Otro ion que puede causar algún problema de acumulación en el suelo es el cloro, ya que cuando se tienen condiciones de baja humedad aprovechable en el suelo los iones que permanecen en solución son el cloro y los sulfatos, que representan un peligro de salinidad debido a que incrementan la presión osmótica en el suelo y puede afectar el desarrollo del cultivo; el valor encontrado fue de 1.67 meq.L^{-1} muy por debajo de niveles críticos; por lo que no existe ningún grado de restricción para el uso del agua debajo de 4.0 meq.L^{-1} ; el nivel de sulfatos está bajo con un valor de 0.07 meq.L^{-1} , no representando problema alguno para el uso del agua en la agricultura.

Los bicarbonatos en el agua de riego, a pesar de que en la actualidad ya no representan un riesgo alto de alcalinización del suelo, no dejan de ser una preocupación, ya que se deben tomar medidas para su neutralización mediante la aplicación de ácidos y finalmente, estos se pierden a la atmósfera en forma de CO_2 convirtiéndose en una fuente de contaminación potencial. Los valores de este parámetro en las aguas residuales analizadas representan un grado de restricción de leve a moderado, el mayor riesgo es que los bicarbonatos reaccionen con el calcio y precipiten disminuyendo la disponibilidad de este.

Con respecto a los microelementos (Fe, B, Mn, Cu, Zn y As) en el agua, no existen restricciones para su uso en la agricultura ya que no se rebasan los límites establecidos. Pérez (2019), en aguas del río Atoyac encontraron los valores siguientes: Fe (5.42), Zn (0.048), Cu (0.018), Ni (0.015), Pb (0.013), Cr (0.021) y Cd (0.002) en ppm; de todos los elementos solo el Hierro rebasó el nivel de restricción con base en las concentraciones permisibles

en aguas residuales (Aceves, 2011); el resto de los elementos estuvo por debajo de los niveles de restricción.

Tabla 2. Contenido de sales en las aguas residuales del río Atoyac usadas para riego en el ejido de San Mateo Ayecac, Tlaxcala

Parámetro	Resultado (meq/L)	Clasificación	Aporte* (kg.ha ⁻¹)
Calcio (Ca ⁺⁺)	1.00	Bajo	100
Potasio (K ⁺)	0.50	Mod. alto	98
Magnesio (Mg ⁺⁺)	1.61	Mediano	98
Sodio (Na ⁺)	1.87	Bajo	215
Nitratos (NO ₃ ⁻)	0.0	No presente	0
Fosfatos (H ₂ PO ₄ ⁻)	0.0	No presente	0
Sulfatos (SO ₄ ⁼)	0.07	Muy bajo	6
Cloruros (Cl ⁻)	1.67	Bajo	297
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	3.11	Mediano	948
Boro (B)**	0.07	Muy bajo	1.5 ^δ
Hierro (Fe)**	0.34	Mod. alto	
Manganeso (Mn)**	0.11	Mod. bajo	
Cobre (Cu)**	0.001	Muy bajo	4 ^δ
Zinc (Zn)**	0.002	Muy bajo	10 ^δ
Arsénico (As)**	0.002	Muy bajo	0.2 ^δ

* Considerando un volumen de riego de 5,000 m³.ha⁻¹.

** Valores dados en ppm.

δ Límite máximo permisible.

Con respecto a los parámetros para evaluar la conveniencia del uso de aguas para riego (ver Tabla 3) se puede observar que salinidad efectiva (SE), salinidad potencial (SP), relación de adsorción de sodio (RAS) y carbonato de sodio residual (CSR) no presentan algún grado de restricción, lo que indica que los niveles de sales en las aguas residuales del río Atoyac son bajas, lo cual coincide con lo encontrado por Hernández (2011). De acuerdo con la propuesta de Richards (1954), el agua residual del río Atoyac en el ejido San Mateo Ayecac se clasifica como

C2S1 ($CE=0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; $RAS=0.87$) lo que indica un peligro de sodicidad bajo y salinidad media, siempre y cuando se realicen lavados moderados. La práctica del riego en el ejido de Ayecac se realiza de una forma empírica con un alto desperdicio de agua lo que provoca el lavado de las pocas sales que pudieran acumularse en el perfil del suelo y salgan de la zona de desarrollo radicular de los cultivos.

Es evidente que la presencia de HCO_3^- puede reaccionar con el Ca^{2+} provocando que este precipite y el Na^+ se convierta en un riesgo mayor; conforme se incrementa la salinidad en el agua existe mayor riesgo de que se incremente el nivel de sodicidad en el suelo. La conductividad eléctrica del agua no representa un peligro para su uso en la agricultura ya que el valor encontrado ($0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) está por debajo de $0.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ siempre y cuando se mejoren las prácticas de riego a corto plazo.

El pH del agua es neutro, sin embargo, desde el punto de vista agrícola tiene repercusiones en la absorción nutrimental, ya que el rango óptimo para el desarrollo de los cultivos es de 5.5 a 6.5. Dado que el riego en la zona es rodado es difícil corregir este problema; pero se puede establecer una estrategia para corregir el problema en el suelo como es la aplicación de azufre o yeso en función del pH del suelo. Con respecto al Carbonato de Sodio Residual, los bicarbonatos son mayores que $\text{Ca} + \text{Mg}$, lo que posibilita que se forme NaHCO_3 manteniéndose en solución aún después de que se precipitan los $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ pudiendo desplazar al Ca y Mg y causar problemas de defloculación de arcillas.

Tabla 3. Parámetros de salinidad determinados en aguas residuales del río Atoyac para riego en el ejido de San Mateo Ayecac, Tlaxcala

Parámetro	Resultado	Grado de restricción
CE (dS.m ⁻¹)	0.54	Ninguno
pH	7.09	Neutro
Salinidad efectiva (SE) (meq.L ⁻¹)	2.37	Ninguno
Salinidad potencial (SP) (meq.L ⁻¹)	1.70	Ninguno
Relación de adsorción de sodio (RASaj)	0.87	Ninguno
Carbonato de sodio residual (CSR) (meq.L ⁻¹)	0.5	Ninguno
Cloruros (Cl ⁻¹) (meq.L ⁻¹)	1.67	Ninguno
Sodio (Na ⁺) (meq.L ⁻¹)	1.87	Ninguno
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻¹) (meq.L ⁻¹)	3.11	Leve a moderado

Análisis de la fertilidad del suelo

En la Tabla 4, se muestran los resultados obtenidos del análisis de fertilidad del suelo regado con aguas residuales en el ejido de San Mateo Ayecac. El pH del suelo refleja condiciones de alcalinidad lo que ocasiona que los micronutrientes no estén disponibles por su reacción con los bicarbonatos. De igual manera, este valor indica que en el suelo existe una fuerte acumulación de sodio, tal como se muestra en dicho Cuadro, con un valor de 375 ppm lo que equivale a 1.6 meq.kg⁻¹. El nivel de pH que presenta este suelo indica el requerimiento de yeso para llevar dicho valor de pH a 6 y que se eliminen los problemas de sodicidad. Con base en este parámetro se requiere la aplicación de 1.62 t.ha⁻¹ de yeso agrícola para reducir el Porcentaje de Sodio Intercambiable de 7.4 a 5 %.

El contenido de materia orgánica (MO) en el suelo es bajo, a pesar de estar aplicando aguas residuales que regularmente presentan una carga alta de material orgánico, lo que indica que el nivel de oxidación de la MO en el suelo es alto, inclusive si se compara con la salud del suelo, el nivel de emisión de CO₂ es medio (170 mg.kg⁻¹) lo que muestra un aprovechamiento razonable de la MO, pero subóptimo, por lo que se sugiere

mantener una cubierta orgánica durante todo el ciclo de producción e incorporar microorganismos benéficos (INTAGRI, 2018).

El porcentaje de saturación de bases en el suelo es de Ca 63.9, Mg 26.3, K 2.45 y Na 7.4; lo que indica que Ca y K están por debajo de los niveles de referencia (Ca 60-75; K 3-7 %). En cambio, Mg y Na se encuentran por encima de los niveles de referencia para estos cationes (Mg 15-20; Na <5%) lo que causa problemas de disponibilidad de Ca y K ya que estos son antagonicos con Mg y Na que se encuentran en niveles elevados. Hernández (2011) en el Distrito de Riego de Tulancingo, Hidalgo, encontró incrementos en los niveles de la mayoría de los iones en suelos regados con aguas residuales, comparados con el testigo; lo cual difiere con los resultados encontrados en el presente estudio.

Con la finalidad de elevar el porcentaje de saturación de potasio se requiere aplicar $1,500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de sulfato de potasio el cual se puede dividir en cantidades de 500 kg en un periodo de 3 años y evitar los desbalances nutrimentales. Para el calcio, con la aplicación de yeso ($1.62 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$) sería suficiente para incrementar el nivel de saturación en los sitios de intercambio del suelo, de otra forma se puede aplicar 600 kg solo en el área útil y reducir la aplicación de este producto y de esta forma reducir costos.

La conductividad eléctrica del suelo como medida indirecta del contenido de sales en el suelo es baja ya que de acuerdo con Richards (1954) un suelo se considera normal cuando la CE está por debajo de $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Con respecto al contenido de micronutrientes se puede observar que el suelo tiene un contenido moderadamente bajo de B, Fe y Zn, bajo en Mn por lo que es necesario suplementar estos nutrientes que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

Tabla 4. Contenido de sales en suelo regado con aguas residuales del río Atoyac

Parámetro	Resultado (ppm)	Calificación	Nivel medio (ppm)
MO (%)	0.69	Bajo	1.81-2.30
pH	8.43	Alcalino	5.5-6.5
CE (dS.m ⁻¹)	1.06	Bajo	<4
Req. Yeso (t.ha ⁻¹)	1.62	-	-
Fósforo Bray	16.8	Mod. bajo	21-30
Potasio	211	Mediano	200-400
Calcio	2814	Mod. alto	1500-2500
Magnesio	706	Mod. alto	200-400
Sodio (PSI)	375 (1,6) (7.35)*	Mod. alto	<5
Nitratos	19.4	Mediano	20-40
Hierro	7.4	Mod. bajo	9-12
Zinc	0.64	Mod. bajo	1.3-2.5
Manganeso	3.33	Bajo	7-12
Cobre	0.81	Mediano	0.9-1.2
Boro	0.91	Mod. bajo	0.9-1.4
Plomo	7.5	-	5.0
Mercurio	<1	-	1.0
Silicio	76.8	-	5.0
Berilio	<5	-	5.0

* Los valores entre paréntesis corresponden a meq.100g⁻¹ y porcentaje de saturación de sodio, respectivamente.

Con relación a la presencia de metales pesados en el suelo provenientes de las aguas residuales utilizadas en el riego, se observaron niveles por encima de límite permitido para plomo (Pb) y Silicio (Si), lo que puede afectar de manera significativa el desarrollo de los cultivos y con ello la salud de los consumidores (Pérez, 2019). Se ha considerado que los elementos que representan el mayor daño potencial, cuando son aplicados sin

control a suelos agrícolas, son B, Cd, Cu, Mo, Ni y Zn (Cisneros et al., 2001). Sin embargo, B, Cu, Mo, Ni y Zn son elementos esenciales para las plantas, los cuales se encontraron en niveles que no representan un riesgo para los cultivos.

Tabla 5. Dosis de fertilización generadas para algunos cultivos producidos en la zona de estudio

Nutrimento	Dosis de fertilización (kg.ha ⁻¹)			
	Maíz	Brócoli	Tomate de cáscara	Lechuga
N	218.0	298.0	32.0	52.0
P ₂ O ₅	100.0	120.0	80.0	50.0
K ₂ O	0	52.0	0	0
Ca	0	0	0	0
Mg	0	0	0	0
S	0	19.0	0	0
Fe	0	0	0	0
Zn	1.5	3.0	1.0	1.0
Mn	0.5	1.0	0.2	0.2
Cu	0	0	0	0
B	0.2	0.4	0	0
Rend. (t.ha ⁻¹)	10.0	20.0	15.0	20.0

Con base en el contenido nutrimental del suelo y el agua del río Atoyac (ver Tablas 2 y 4) con que se riegan los cultivos en el ejido de San Mateo Ayecac, Tlaxcala; se generaron las dosis de fertilización para algunos de los cultivos que se producen en el área de estudio (ver Tabla 5). Es evidente que los nutrimentos más limitantes son el nitrógeno y el fósforo por lo que se deben buscar estrategias para el aporte de estos nutrimentos y mejorar los procesos fisiológicos en la planta como enraizamiento y floración para asegurar un adecuado crecimiento y desarrollo de la planta y obtener mayores rendimientos.

A pesar de que el B, Zn y Mn pueden acumularse en el suelo al ser regados con aguas que los contienen, en los suelos analizados se encuentran en niveles bajos por lo que se deben aplicar en forma de sales para abastecer las necesidades de los cultivos en función de los rendimientos propuestos. Con base en

la textura franco arenoso y la CIC (22 cmolc.kg^{-1}) de los suelos analizados el límite de carga para que se alcance la saturación de Ni, Zn y Cu es mayor a 200 años (EPA, 2009; como se citó en Cisneros et al., 2001), por lo que en el corto plazo no representan un peligro para los cultivos.

Conclusiones

Con base en los análisis químicos practicados a las aguas residuales en San Mateo Ayecac, los contenidos de Ca, Mg y K, permite ajustar la solución nutritiva disminuyendo la aplicación de fertilizantes en forma artificial. La presencia de Na^+ , Cl^- y SO_4^{2-} , no son restrictivos, por lo que se pueden utilizar en agricultura de manera confiable. Los valores de CE como medida de la presencia de sólidos disueltos totales, no son una restricción para el uso del agua en la agricultura, ya que no representa un riesgo de salinidad al suelo. Los parámetros de SP, SE, RAS y CSR se encuentran en niveles bajos por lo que no representan un riesgo para el uso de las aguas en este tipo de agricultura

Con base en los parámetros de calidad del agua, las aguas residuales del río Atoyac utilizadas para riego en el Ejido de San Mateo Ayecac a través del canal Rojano y sus ramales “La Rápida” y “Ajejela” cumplen con los parámetros químicos requeridos para su uso en la agricultura, sin riesgos de salinización ni sodificación para los cultivos y ni para los suelos en los que se practique dicha agricultura en el corto y mediano plazo.

Con respecto al análisis de la fertilidad del suelo, se observa un nivel alto de pH y Na lo que requiere la aplicación de yeso para disminuir el riesgo asociado a la presencia de este elemento, mientras que los niveles de fósforo, B, Fe, Zn y Mn son moderadamente bajos, por lo que se requiere poner atención para mejorar su disponibilidad para el crecimiento de los cultivos. La presencia de metales pesados en el suelo regado con aguas residuales es para plomo y silicio, lo que puede afectar el desarrollo de los cultivos.

Referencias bibliográficas

- Aceves, N. E. (2011). *El ensalitramiento de los suelos bajo riego*. 2ª. Edición. Biblioteca Básica de Agricultura, Colegio de Postgraduados, Mundi-Prensa.
- Aguilera, C. M. y Martínez, R. E. (1986). *Relaciones agua suelo planta atmósfera*. 3ª. Edición. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo.
- Ayers, R. S. y Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and drainage paper*, 29(1), 182.
- Bojórquez, F. (2008). *Parámetros de agua de riego. Productores de Hortalizas*. <http://www.hortalizas.com/irrigacion/parametros-de-agua-de-riego/>
- Boman, J. B., Wilson, C. P. y Onterman, A. E. (2002). Understanding water quality parameters for citrus irrigation and drainage systems. *Circular No. 1406*. IFAS Extension. University of Florida.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X. y Aguilar A. (2000). *Manual de interpretación de análisis de suelos, aguas agrícolas, plantas y ECP*. 2da edición, INTAGRI.
- CEPIS-OPS-OMS (2007). *Medidas de protección sanitaria en el aprovechamiento de aguas residuales. Directrices sobre la calidad de los efluentes empleados en la agricultura*. <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltex/repind53/dis/dis.html=discap72>
- Chen, Y., Li, X. y Shen, Z. (2004). Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. *Chemosphere*, 57(3), 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.05.044>
- Cisneros, X., González, J. y Fuentes, C. (2001). *Perspectiva de aprovechamiento de las aguas residuales en la agricultura*. IMTA, CONAGUA.
- Cisneros, E. O. X. y Saucedo, R. H. (2016). *Reúso de aguas residuales en la agricultura*. Primera edición. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2006). *Manejo de las aguas residuales para el combate a la pobreza en grandes ciudades*. IV Foro Mundial del Agua.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestro y análisis*. SEMARNAT.
- _____ (2010). *ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales superficiales de la Región Hidrológica número 18 Balsas*. DOF.
- Duncan, M. y Cairncross, S. (1990). *Directrices para el uso sin riesgos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. Medidas de protección de la salud pública*. Organización Mundial de la Salud.
- Food and Agricultural Organization (FAO) (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio de FAO sobre riego y drenaje 66*. Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i2800s.pdf>
- _____ (2015). *World Soil Charter*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i4965e.pdf>
- FERTILAB (2021). *Manual de muestreo de suelo, planta y agua*. Cuarta Edición. www.fertilab.com.mx
- Google Earth (2021, septiembre). *Plataforma Google Earth. Elaboración de mapa temático*. <https://earth.google.com/web/>
- Guadarrama, B. M. E. y Galván, F. A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(4).
- Hazem, K. M. y Pietkiewicz, S. (1993). Salinity effects on plant growth and other physiological processes. *Physiol. Plant.*, (15), 89-124.
- Hernández, A. E. (2011). *Uso de aguas residuales en la agricultura. Estudio de caso; Distrito de riego 028*,

- Tulancingo, Hidalgo, México*. Primera Edición. Universidad Autónoma Chapingo.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (2005). *Estudio de clasificación del río Atoyac, Puebla-Tlaxcala; Informe final*. CONAGUA.
- _____ (2018). *Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura*. Sexta Edición.
- INTAGRI (2018). Disponibilidad de Nutrientes y el pH del Suelo. *Serie Nutrición Vegetal*, 113, 4.
- INTAGRI (2018b). La salud del suelo. *Serie Suelos*, 37, 3.
- Jaramillo, M. F. y Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: a review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(2), 1,734-1,753. <https://doi.org/10.3390/su9101734>
- Jung, K., Jang, T., Jeong H. y Park, S. (2014). Assessment of growth and yield components of rice irrigated with reclaimed wastewater. *Agric. Water Manag.*, 138(1), 17-25.
- Letey, J., Sojka, E. R., Upchurch, R. D., Cassel, K. D., Olson, K. R., Payne, W. A. y Triplett, G. B. (2003). Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal Soil Water Conservation*, 58(4), 180-187.
- Martínez, E., Rodríguez, P.F., Shruti, V.C., Sujitha, S., Morales, S. y Muñoz, N. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: multivariate approach. *Environ Earth Sci.*, 76-95.
- Mateo S., J. y González, G. A. (2017a). Producción, tratamiento y reutilización de aguas residuales municipales en América Latina y el Caribe. En Sagasta, J. M. *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe. Estado, principios y necesidades*. (Pp. 10-20). FAO.
- _____ (2017b). Contexto de la reutilización de aguas residuales municipales en América Latina y el Caribe. En Sagasta, J. M. *Reutilización de aguas para agricultura*

- en América Latina y el Caribe. Estado, principios y necesidades. (Pp. 1-8). FAO.
- Medeiros, S., Soares, P. A., Ferreira, J., de Matos Neves, A. y de Souza, J. (2005). Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo das alterações químicas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9(4), 603-612.
- Méndez, F., M. A., Ricardo, M. P., Pérez, J., Hernández, C. y Campos, O. (2006). Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas en la agricultura urbana. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 15, 17-21.
- Ortega, S. F. y Orellana, G. R. (2007). El riego con aguas de mala calidad en la agricultura urbana. Aspectos a considerar. II. Aguas residuales urbanas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (3), 25-27. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216306>
- Pereira, B., He, Z., Stoffella, P. J., Montes, C. R., Melfi, A. J. y Baligar, V. C. (2012). Nutrients and nonessential elements in soil after 11 years of wastewater irrigation. *J. Environ. Quality*, 41(3), 920-927.
- Pérez, C. G. (2019). *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 de Doctorado en Ciencias Ambientales]. BUAP. Puebla.
- Rascón, A. E., Peña, C. E., López, C. R., Cantú, S. M. y Narro, F. E. A. (2005). Impacto en algunas propiedades físicas del suelo por aplicación de aguas residuales. *TERRA Latinoamericana*, 26(1), 69-74. <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=57311561009>
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. y Mashali, A. M. (1992). The use of saline waters for crop production. *FAO irrigation and drainage paper*, 48, 28-45.
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Handbook*, 60, 87-115.
- _____ (1985). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Quinta reimpresión. Editorial Limusa.
- Rodríguez, E. N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>
- Soler, R., Brunetti, P. y Senesi, N. (2002). Comparative chemical and spectroscopic characterization of humic acids from sewage sludges and sludge-amended soils. *Soil Sci.*, 167, 235-245.
- Toledo, A. (2002). El agua de México y el mundo. *Gaceta Ecológica*, 64, 9-18.
- Winpenny, J., Heinz, I. y Koo-Oshima, S. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos? Informe sobre temas hídricos 35*. FAO.



**SECCIÓN III.
DIMENSIONAMIENTO
POLÍTICO, ECONÓMICO Y
TECNOLÓGICO**



CAPÍTULO 6. PERCEPCIÓN Y PRÁCTICAS DE AGENTES SOCIALES EN TORNO A LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO ATOYAC EN TEPETITLA DE LARDIZÁBAL

Wilfrido Gutiérrez Ortiz¹

Introducción

El presente trabajo aborda como tema de investigación la producción y reproducción de la contaminación del agua del río Atoyac a partir de la interacción de agentes sociales del municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala. Cabe hacer mención que dicha contaminación ha sido caracterizada como grave desde distintas perspectivas y enfoques en trabajos de diversos centros de investigación científica a nivel nacional, entre los que destacan los realizados por Regina Montero Montoya (2015) del Instituto de Investigaciones Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), analizando daños genotóxicos en la región, por Lilia Rodríguez Tapia y Jorge A. Morales Novelo (2014) de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), sobre los daños ambientales y las tecnologías de mitigación, entre otros.

En el ámbito gubernamental, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2005), que es un organismo público descentralizado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), llevó a cabo el estudio de clasificación del río Atoyac en Puebla y Tlaxcala, con el que se determinó que

¹ Doctorante en Gobierno, Gestión y Democracia por el Colegio de Tlaxcala, A.C. y Catedrático en la Universidad Politécnica de Tlaxcala, correo-e: wilfridogo@coltlax.edu.mx

“la capacidad de asimilación del río está sobrepasada por la carga contaminante aportada por las descargas” (p. 7).

En el ámbito mediático y jurídico cabe destacar la labor de organizaciones como el Centro Fray Julián Garcés, que han expuesto y denunciado esta situación ante medios de comunicación masiva y presentado demandas ante instancias internacionales como el Tribunal Latinoamericano del Agua (TLA, 2006) y la Comisión Nacional de Derechos Humanos (CNDH, 2017) cuya sentencia y recomendación emitidas respectivamente, fueron favorables a la organización en mención, de la misma manera resalta el trabajo titulado “Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac” publicado por la organización ambientalista Greenpeace México A.C. (2014).

Como se puede apreciar, a pesar de que se trata de un asunto que ha cobrado notoriedad tanto a nivel nacional como internacional, se hace necesario realizar estudios que coadyuven a un diagnóstico más completo, visibilizando la interacción de diversos actores o agentes sociales que en diferentes momentos tuvieron la oportunidad de generar una diferencia por haber ocupado un cargo de representación popular o directivo en alguna área del gobierno o estar al frente de algún grupo organizado, desde donde se tomaron decisiones que de una u otra manera influyeron en el desarrollo y curso del problema en mención.

La relevancia de esta investigación reside en que aborda un aspecto poco estudiado como lo es el de la interacción de los actores o agentes, para lo cual se recurre a la “Teoría de la estructuración” (Giddens, 1984), que es una teoría que emplea principalmente los conceptos de estructura, reglas, recursos, agente social y prácticas sociales para analizar la producción y reproducción de sistemas sociales.

De esta manera, se buscan visibilizar elementos que, desde la perspectiva de las prácticas sociales de los agentes, contribuyan a un estudio más amplio e integral sobre la contaminación del río Atoyac en el municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Para lograr lo anterior, se contó con la participación de agentes que accedieron a ser entrevistados para conocer su punto de vista sobre el tema, sin embargo, al llevarse a cabo en el contexto de la pandemia de la COVID-19, varias entrevistas

fueron realizadas de manera virtual o por medios electrónicos, lo cual aunado a otros factores como la dificultad de localizar a las personas que en algún momento ocuparon las delegaciones de dependencias federales del sector ambiental y que en su mayoría provenían de otros lugares del país o la negativa de muchos otros para hablar sobre el tema por considerarlo delicado ya que desde su perspectiva puede afectar sus carreras políticas, impidió tener la cobertura deseada.

En el desarrollo de esta investigación, se tuvo como objetivo caracterizar las prácticas sociales de los agentes que en el contexto de una estructura tanto formal como informal y disponiendo de recursos de autoridad y económicos han coadyuvado de manera voluntaria o involuntaria a la producción y reproducción de la problemática de la contaminación del agua del río Atoyac.

Fundamentación teórico-conceptual

Teoría social y teoría de la estructuración

Con el propósito de explicar la producción y reproducción del problema de la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal, se identifica y analiza la interacción estructura y acción, desde la perspectiva de la teoría de la estructuración expuesta por el sociólogo inglés Anthony Giddens, primeramente, en su obra *Las nuevas reglas del método sociológico* (1976) y posteriormente en *La Constitución de la Sociedad, bases para la teoría de la estructuración* (1984), siendo en esta última, donde al explicar su teoría, comienza aclarando lo que para él significa la teoría social:

El autor emplea la expresión de teoría social, poniendo énfasis en la interacción del ser humano con las instituciones, a las cuales concibe como “los rasgos más duraderos de una vida social” (Giddens, 1984, p. 60). Ahora bien, en el tránsito hacia una definición de lo que es la teoría de la estructuración, recurre a lo que llama la dualidad de estructura, expresándola de la siguiente manera:

Tabla 1. Dualidad de estructura

Estructura(s)	Sistema(s)	Estructuración
Reglas y recursos o conjuntos de relaciones de transformación que se organizan como propiedades de sistemas sociales	Relaciones reproducidas entre actores o colectividades, organizadas como prácticas sociales regulares	Condiciones que gobiernan la continuidad o trasmutación de estructuras y, en consecuencia, la reproducción de sistemas sociales

Fuente: Giddens (1984).

Es importante realizar las presentes puntualizaciones:

Analizar la estructuración de sistemas sociales significa estudiar los modos en que esos sistemas, fundados en las actividades inteligentes de actores situados que aplican reglas y recursos en la diversidad de contextos de acción son producidos y reproducidos en una interacción. Crucial para la idea de estructuración es el teorema de la dualidad de estructura implicado lógicamente en los argumentos expuestos antes. La constitución de agentes y la de estructuras no son dos conjuntos de fenómenos dados independientemente, no forman un dualismo, sino que representan una dualidad. (Giddens, 1984, p. 61)

Por otro lado, en la búsqueda de los principales objetivos de la teoría de la estructuración, se encuentran las aportaciones de Adriana García del Colegio de México, en su trabajo titulado *La teoría de la estructuración y su observación desde la acción* (2009), quien realiza el siguiente planteamiento:

Me centrare en el análisis de la propuesta de Anthony Giddens -denominada Teoría de la estructuración-, que tiene como uno de sus principales objetivos lograr una novedosa síntesis entre la estructura y la acción. Aquí intentare mostrar que, a pesar de incorporar la estructura, la elaboración teórica de Giddens sigue partiendo de la acción individual. Acaba presentando la sociedad como una consecuencia no buscada del cruce de acciones individuales. (García, 2008, pp. 31-32)

Por otro lado, Mariela Cambiasso, de la Universidad de Buenos Aires, en su trabajo titulado *Consideraciones críticas sobre la teoría de la estructuración de Anthony Giddens* (2015), fomentó

la discusión en torno a la teoría de la estructuración de Giddens (1984). Se expresa de esta manera:

La teoría de la estructuración constituye un eje central en la teoría social de Anthony Giddens, contiene gran parte de los conceptos fundamentales que presenta el autor y se plantea como un marco conceptual para el análisis de la forma en que los seres humanos producen y reproducen la sociedad a través de sus prácticas. (Cambiasso, 2015, p. 217)

Es así como Cambiasso otorga mayor énfasis en el uso que se le puede dar a la teoría de la estructuración para el análisis del alcance de las prácticas sociales de los seres humanos.

Estructura

La estructura, por tratarse de uno de los elementos que conforman la teoría de la estructuración, es un concepto que requiere ser analizado de manera detallada, para clarificar no solo la forma en que es concebido por Giddens, sino también conocer diversas posturas al respecto. Tomando en cuenta que uno de los aspectos que interesan a este trabajo es visibilizar ciertas relaciones, que en el caso de Tepetitla de Lardizábal se han estabilizado, favoreciendo la contaminación del río Atoyac, tomamos como referente lo expresado por Giddens (1984):

En teoría de la estructuración se mira como «estructura» reglas y recursos con implicación recursiva en una reproducción social; ciertos aspectos institucionalizados de sistemas sociales poseen propiedades estructurales en el sentido de que por un tiempo y por un espacio hay relaciones que se estabilizan. «Estructura» se puede conceptualizar abstractamente como elementos normativos y códigos de significación: dos aspectos de reglas. También son dos las clases de recursos: recursos de autoridad, nacidos de la coordinación de la actividad de agentes humanos, y recursos de asignación, que provienen del control sobre productos materiales o sobre aspectos del mundo material. (Giddens, 1984, p. 32)

Es así como Giddens (1984) retoma lo que es la dualidad de estructura y su nexa con las relaciones de poder:

Podemos expresar la dualidad de estructura en relaciones de poder del siguiente modo. Recursos (enfocados a través de significación y legitimación) son propiedades estructurales de sistemas sociales, que agentes entendidos utilizan y reproducen en el curso de una interacción. Poder no se conecta de manera intrínseca con la consecución de intereses sectoriales. En esta concepción, el uso de poder no caracteriza a tipos específicos de conducta sino a toda acción, y el poder mismo no es un recurso. Recursos son medios a través de los cuales se ejerce poder, como un elemento de rutina de la actualización de una conducta en una reproducción social (Giddens, 1984, p. 52).

Sobre la producción y reproducción de una acción social y la reproducción sistémica que en el caso de estudio se detecta, dada la perdurabilidad del problema planteado a lo largo del tiempo, resulta de gran importancia indagar sobre las principales tesis de la teoría referida:

Una de las tesis principales de la teoría de la estructuración es que las reglas y los recursos que se aplican a la producción y reproducción de una acción social son, al mismo tiempo, los medios para la reproducción sistémica (la dualidad de estructura). (Giddens, 1984, p. 55)

Al respecto, García (2008) al presentar su trabajo, plantea “Aquí se buscará fundamentar que la estructura solo es visible a través de las acciones individuales (ya sea como consecuencias de estas o como “portadoras” de la reproducción social)” (p. 34), y continúa:

Decir que su teoría se posiciona en el actor y su acción no implica decir que Giddens olvide incluir la estructura y los problemas relacionados con ésta. Evidentemente el autor está interesado en tratar el mantenimiento de la sociedad (la permanencia de las instituciones) y la reproducción de la misma (cómo es posible tal permanencia), así como la posibilidad de interrelación entre actores. Sin embargo, y como se acaba de mencionar, tales cuestiones son tematizadas y resueltas desde la perspectiva del individuo actuante y las consecuencias que su actuación desencadena. (García, 2008, p. 32)

Por su parte, Cambiasso (2015) realiza un intento por aclarar la forma en que debe concebirse a la estructura en su relación con los individuos y el papel de esta interacción en la producción y reproducción de la acción y la vida social:

Por ello sostiene que la estructura no debe ser concebida ni como algo externo a los individuos ni debe asimilarse con constreñimiento, debido a que es constrictiva y habilitante al mismo tiempo. De modo que, en la teoría de la estructuración el momento de producción de la acción es también un momento de reproducción en el contexto en que desarrolla la vida social. (Cambiasso, 2015, p. 224)

Acción

Otro de los elementos de la teoría de la estructuración lo conforma la acción, que es un aspecto que interesa a los propósitos de esta investigación y al que Giddens (1984), atribuye gran importancia marcando diferencia con la corriente estructuralista, como se puede apreciar en la siguiente afirmación:

Buena parte de la teoría social, sobre todo la que se asocia a la sociología estructural, ha atribuido a los agentes mucho menos saber del que poseen en realidad. Los resultados de esto se ven muy cómodamente en el trabajo empírico que descuida recoger información tal que permitiera acceder a la inteligencia de los agentes en toda su amplitud, al menos en dos aspectos. Lo que los actores son capaces de decir acerca de las condiciones de su acción y de la acción de otros se reduce en perspectiva si los investigadores no reconocen la significación posible de un conjunto de fenómenos discursivos a los cuales, como los actores sociales mismos, ellos sin duda podrían prestar ceñida atención, pero que en la investigación social a menudo simplemente se dan por supuestos. (Giddens, 1984, p. 31)

De la misma manera como lo hizo con la dualidad de estructura, Giddens (1984) establece una relación de la acción con el poder, con el propósito de visibilizar el alcance de la acción de lo que denomina agente, de la siguiente manera:

¿De qué índole es el nexo lógico entre acción y poder? Aunque las ramificaciones de esta cuestión son complejas, la relación básica implícita se puede señalar

cómodamente. Ser capaz de «obrar de otro modo» significa ser capaz de intervenir en el mundo, o de abstenerse de esa intervención, con la consecuencia de influir sobre un proceso o un estado de cosas específicos. Esto presupone que ser un agente es ser capaz de desplegar (repetidamente, en el fluir de la vida diaria) un espectro de poderes causales, incluido el poder de influir sobre el desplegado por otros. Una acción nace de la aptitud de «producir una diferencia» en un estado de cosas o cursos de sucesos preexistentes. Un agente deja de ser tal si pierde la aptitud de «producir una diferencia», o sea, de ejercer alguna clase de poder. (Giddens, 1984, p. 51)

Esta es la ruta que Giddens (1984), sigue para para llegar a la definición sobre lo que debe entenderse por acción:

Acción es un proceso continuo, un fluir en el que el registro reflexivo que el individuo mantiene es fundamental para el control del cuerpo que los actores de ordinario mantienen de cabo a cabo en su vida cotidiana. Soy el autor de muchas cosas que no me propongo hacer, y que quizá no quiero producir, a pesar de lo cual las hago. A la inversa, puede haber circunstancias en las que intente lograr algo, y en efecto lo alcance, aunque no directamente por mi obrar.

Con base en la definición anterior, Giddens (1984), remarca el nexo inherente entre acción y agente de la siguiente manera:

Una acción nace de la aptitud del individuo para «producir una diferencia» en un estado de cosas o curso de sucesos preexistentes. Un agente deja de ser tal si pierde la aptitud de «producir una diferencia», o sea, de ejercer alguna clase de poder. (Giddens, 1984, p. 51)

Lo anterior permite pasar a analizar las consecuencias de las acciones individuales, las cuales recobran gran importancia desde el punto de vista de García (2008), por tal motivo también hace referencia a la reflexividad que se encuentra presente en la acción de los agentes, lo cual queda de manifiesto en la siguiente expresión:

A partir de lo anterior, se observa que los medios para lograr integración social o sistémica son básicamente producto de consecuencias buscadas y no buscadas de acciones individuales. Así, la reciprocidad y, por ende, la conformación de estructuras es un proceso oscuro

resultado de una mezcla de consecuencias de “acciones individuales”. (García, 2008, p. 44)

La relación de la acción con las instituciones y como la misma acción expresada en prácticas sociales, se constituye el elemento primordial para la producción y reproducción de la estructura:

La noción de acción supone la de institución y viceversa, por ello explicar esta relación implica dar cuenta de cómo tiene lugar la estructuración de las prácticas sociales, es decir la producción y reproducción a través del tiempo y del espacio (Giddens, 1982/1999). De este modo, se centra en el carácter repetitivo de las prácticas sociales, considerando aquello que persiste en el sistema social, ya que tal como se precisará más adelante son las prácticas de los hombres las que permiten producir y reproducir la estructura (Cambiasso, 2015, p. 221)

Estructuración de sistemas sociales

Giddens (1984) define “sistema(s) como relaciones reproducidas entre actores o colectividades, organizadas como prácticas sociales regulares” (p. 61). Posteriormente el autor en mención, de la misma manera que lo hizo con la estructura y la acción, procede a explicar la relación entre conceptos como el poder y sistemas sociales en el marco de lo que denomina dialéctica del control en sistemas sociales:

No debemos entender las estructuras de dominación ínsitas en instituciones sociales como molinos para «seres dóciles» que se comportaran como los autómatas propuestos por la ciencia social objetivista. El poder en sistemas sociales que disfrutan de cierta continuidad en tiempo y espacio presupone relaciones regularizadas de autonomía y dependencia entre actores o colectividades en contextos de interacción social. Pero todas las formas de dependencia ofrecen ciertos recursos en virtud de los cuales los subordinados pueden influir sobre las actividades de sus superiores. Es lo que denomino la dialéctica del control en sistemas sociales. (Giddens, 1984, p. 52)

Es así como Giddens (1984) señala algo que debe tomarse en cuenta al analizar los sistemas sociales:

Analizar la estructuración de sistemas sociales significa estudiar los modos en que esos sistemas, fundados en las actividades inteligentes de actores situados que aplican reglas y recursos en la diversidad de contextos de acción, son producidos y reproducidos en una interacción. (Giddens, 1984, p. 61)

Por lo cual Giddens (1984), al señalar cómo se organizan los sistemas sociales agrega un nuevo elemento de análisis que es la postura de los agentes expresándolo de esta manera:

Sistemas sociales -he señalado- se organizan como prácticas sociales regularizadas, sustentadas en encuentros dispersos por un espacio-tiempo. Ahora bien, los actores cuya conducta constituye esas prácticas tienen «postura». Todos los actores tienen «postura» o están «situados» en un espacio-tiempo, y viven a lo largo de lo que Hagerstrand denomina sus sendas espacio-temporales, y también tienen postura en un orden relacional, como lo indica la expresión misma «posición social». Sistemas sociales sólo existen en la continuidad de prácticas sociales que se extinguen en el tiempo, y a través de estas. (Giddens, 1984, p. 116)

Metodología

En la realización del presente trabajo, se identificaron a personas que durante el período comprendido de 1990 al 2021, se caracterizaron por ser tomadores de decisiones en diferentes dependencias de los 3 niveles de gobierno, así como a representantes de grupos organizados que a nivel local han tenido una actuación protagónica con relación a la problemática de la contaminación del agua del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal. Tomando en cuenta que en ambos casos su actuación se llevó a cabo en el marco de ciertas reglas, tanto formales como informales y utilizando determinados recursos políticos, económicos, sociales, religiosos o materiales, son considerados agentes sociales.

Posteriormente se identificaron los espacios desde los cuales dichos agentes sociales realizaron su actividad e interactuaron sobre la problemática en mención, considerando los sectores de medio ambiente y recursos naturales, salud, educación, gobierno local, industria de la mezclilla, actividad

agrícola y religión, para llevar a cabo la aplicación de entrevistas a por lo menos un agente social de cada uno de esos sectores.

Cabe mencionar que la investigación se llevó a cabo en el contexto de la pandemia por la COVID 19 que afecta a todo el planeta, lo cual dificultó en algunos casos llevar a cabo la entrevista de manera personal y, por consiguiente, se realizó de manera virtual, telefónica o por correo electrónico. Cabe resaltar que en muchos casos los entrevistados, solicitaron el beneficio del anonimato.

Otras de las limitaciones en la realización de este trabajo fue la dificultad para localizar sobre todo a ex-delegados de dependencias federales, que en su momento, llegaron provenientes de otros lugares de la república a ejercer el cargo, ex funcionarios estatales y municipales que se negaron a hablar del tema por considerarlo delicado, así como la negativa de la gran industria para hablar del tema, sin contar con que muchos de los agentes buscados ya habían fallecido, migrado o se encontraban en condiciones de salud crítica que ya no les permitía conceder la entrevista. Es así que se elaboraron siete distintas guías de entrevista semiestructurada, para igual número de sectores que se aplicaron a 30 agentes sociales, como a continuación se describe:

Tabla 2. Muestra de agentes sociales entrevistados

Sector	Ámbito	Dependencia/ localidad	Cargo(s)	Período(s)	No. de entrevistas	
Medio ambiente y recursos naturales	Federal	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT	Delegado federal	2004-2005	1	
		Procuraduría Federal de Protección al Ambiente PROFEPA	Delegado federal	2004-2013	1	
		Comisión Nacional del Agua CONAGUA	Director local	2006-2012	1	
		Coordinación General de Ecología CGE		Coordinadores Generales	1999-2003	3
					2003-2005	
				2017-2020		

Salud	Estatal	Secretaría de Salubridad y Asistencia- Organismo Público Descentralizado Salud de Tlaxcala	Secretario y director general	1987-1994 y 2003-2005	1		
Educación		SESA-OPD Salud de Tlaxcala	Secretario y director general	2011-2016	1		
Autoridad local	Municipal	Municipio de Tepetitla de Lardizábal	Presidentes municipales	1989-1991	5		
				1995-1998			
				2002-2005			
				2008-2011			
		Comunidad de Villalta	Funcionarios municipales	2014-2016	3		
				Comunidad de Guadalupe Victoria	Presidentes de comunidad	2017-2021	1
				2014-2016		2	
2017-2021	1						
Económico	Comunidad de San Mateo	Dirigentes de mezclilleros	2010 a la fecha	2			
Social	Ayecac	Comisariada Ejidal	2019-2022	1			
		Delegado del Canal de riego "La Rápida"	2019-2022	1			
		Comisariados ejidales Tepetitla	2016-2018 2018-2021	2			
	Municipio de Tepetitla de Lardizábal	Presidente y secretario de Canal San Lucas	2018-2021	2			

Percepción y prácticas de agentes sociales en torno a la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal

	Villalta	Secretaría del comisariado ejidal de Villalta	2021-2024	1
Religioso	Municipio de Tepetitla de Lardizábal	Párroco de iglesia católica	2019 a la fecha	1

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Los orígenes de la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala

Para los propósitos de esta investigación, resulta muy importante conocer el momento en el cual diversos agentes sociales consideran que se originó la contaminación en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, llamando la atención lo declarado por el ex-secretario de salud de Tlaxcala en varios gobiernos estatales, Salvador Sesin Rosas, al respecto expresa que “Existe un patrón cultural, una costumbre de la gente de utilizar y ensuciar el río, desde el lavado de la ropa doméstica y otras actividades” lo anterior nos remite a pensar que dicho origen se encuentra en tiempos muy remotos, es decir desde el momento que los grupos humanos se asentaron en la riberas del río y comenzaron a realizar actividades que incluía utilizar el agua del río y verter desechos al mismo. Por otro lado, el Sr. Miguel Ángel Romero Serrano quien fuera Cronista Municipal durante diversos periodos en el Municipio de Tepetitla de Lardizábal, señala que:

“La contaminación del río Atoyac en la región, comienza a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con la instalación de varias fábricas como el Carmen,² y el Pilar,³ rastros y mercados en el vecino municipio de San Martín Texmelucan y la introducción de los primeros drenajes sanitarios, por la formación

² Esta industria arribó a San Martín en 1894 con el Sr. Francisco M. Conde y trabajo con Plantas hidroeléctricas, actualmente pertenece al Sr. Benancio Ruiz Corbella y se denomina “Fabrica de San Martín S.A.”.

³ La Fábrica del Pilar se inaugura en San Martín Texmelucan en 1903, es propiedad de los señores González Cosío.

de núcleos de población que descargan sus aguas al río Atoyac”.

En tanto que el Sr. Domingo Ramírez Rojas, que fuera presidente municipal en el período 1989-1991, señala que *“es en la década de los años 50, 70 u 80 cuando se agrava la contaminación del río debido al aumento de la población”* y agrega que *“en 1989 se instala el primer taller de lavandería de mezclilla en la comunidad de San Mateo Ayecac”*. Finalmente, el Sr. José Gregorio Méndez quien se desempeñó como presidente municipal en el período 1995-1998, menciona que *“la contaminación inicia cuando se instala la Fabrica el Pilar y otra ubicada por el mercado de San Martín Texmelucan”*. Al respecto podemos mencionar que en esta investigación se identifican en el tiempo cuatro momentos en los cuales se agregan diferentes fuentes de contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal, como a continuación se detalla:

Tabla 3. Origen y tipo de fuentes de contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal

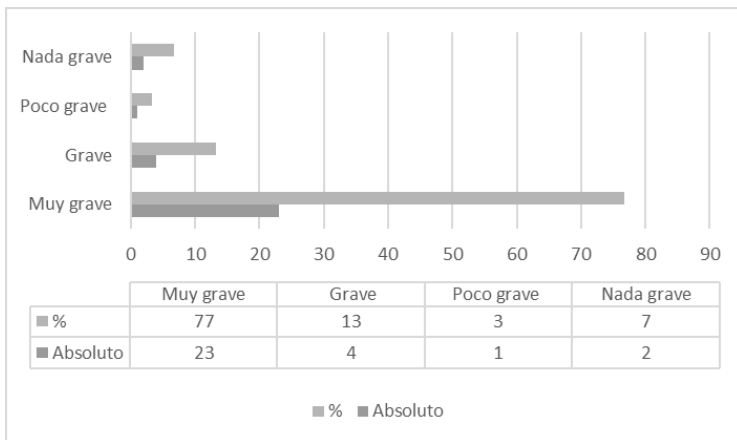
Periodo	Fuente de contaminación
Hasta el siglo XIX	Contaminación proveniente principalmente de actividades económicas primarias, de los pobladores en la ribera del río Atoyac.
Finales del siglo XIX y primera mitad del siglo XX	Proveniente de fuentes domesticas a través de los primeros sistemas de drenaje sanitario de municipios aledaños al río Atoyac, así como de actividades comerciales como rastros y mercados y las primeras fábricas textiles en San Martín Texmelucan.
De los años 50 a los 80 del siglo XX	Contaminación originada por el proceso de industrialización intensiva en San Martín Texmelucan.
Años 90 del siglo XX y principios del siglo XXI	Contaminación proveniente por la industria de lavado y teñido de mezclilla en las comunidades de Ayecac y Villalta del municipio de Tepetitla de Lardizábal.

Fuente: elaboración propia.

La gravedad de la contaminación

Para conocer la percepción sobre la gravedad de la contaminación del río Atoyac en la zona de estudio, a la totalidad de nuestros entrevistados se les realizó la siguiente pregunta: ¿qué tan grave considera la contaminación del río Atoyac y sus consecuencias en Tepetitla de Lardizábal? Obteniendo los siguientes resultados:

Figura 1. Percepción de la gravedad de la contaminación del río Atoyac



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

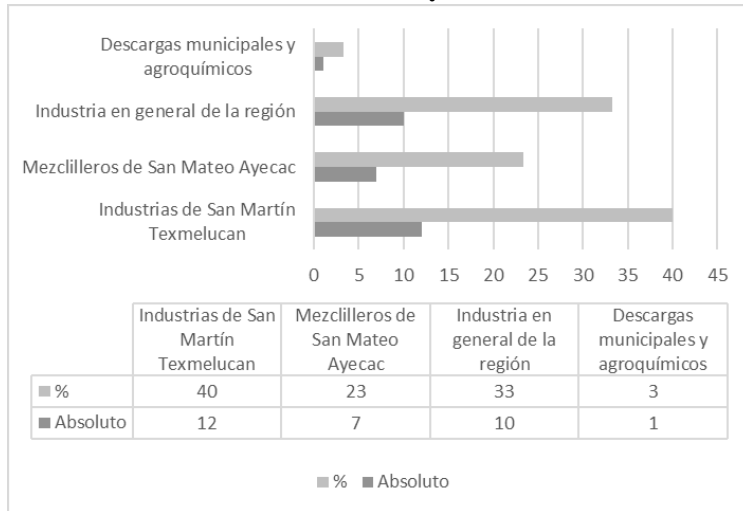
De lo anterior se desprende que para una evidente mayoría de los agentes sociales la contaminación del río Atoyac resulta muy grave, coincidiendo con la percepción mediática y de diversos sectores sociales.

Las principales fuentes de contaminación

En cuanto a la identificación de las principales fuentes de contaminación existe un marcado consenso de que es la actividad industrial, en general, la principal fuente de contaminación, aunque al especificar qué industria por actividad y ubicación geográfica pueden observarse señalamientos divididos, como

puede apreciarse en los resultados obtenidos al aplicar la siguiente interrogante: ¿cuáles considera que son las principales fuentes de contaminación del agua del río Atoyac, específicamente en el municipio de Tepetitla de Lardizábal?

Figura 2. Principales fuentes de contaminación del río Atoyac



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

Cabe destacar que una vez clasificadas las respuestas, la fuente de contaminación más señalada es la actividad industrial de San Martín Texmelucan, principalmente del complejo petroquímico de Pemex⁴ y del corredor industrial Quetzalcóatl,⁵ seguida por la

⁴ En el año de 1969 se instaló la Unidad Petroquímica Texmelucan en la localidad de Moyotzingo, municipio de San Martín Texmelucan del estado de Puebla y a partir de 1985 ésta se convirtió en el Complejo Petroquímico Independencia, el cual abarca una superficie de 100 hectáreas y está ubicado en el kilómetro 76.2 de la autopista México-Puebla, junto a los pueblos de Santa María Moyotzingo de aproximadamente 20 mil habitantes y de San Jerónimo Tianguismanalco, los cuales se asientan a una distancia menor a 1 kilómetro a la redonda de la citada planta petroquímica. La población aledaña a la planta suma aproximadamente 45 mil habitantes. En 1985 el complejo petroquímico puso en operación la planta de dodecil - benceno y alquilarilo pesado y en 1989 comenzó a producir acrilonitrilo (cianuro de vinilo).

⁵ Corredor Industrial Quetzalcóatl, formado por parte de los municipios de San

industria en general de la región, en un tercer lugar la industria mezclillera de San Mateo Ayecac y muy distantes las descargas sanitarias de tipo doméstico y los agroquímicos utilizados en la actividad agrícola.

Elementos normativos y códigos de significación en los agentes sociales gubernamentales

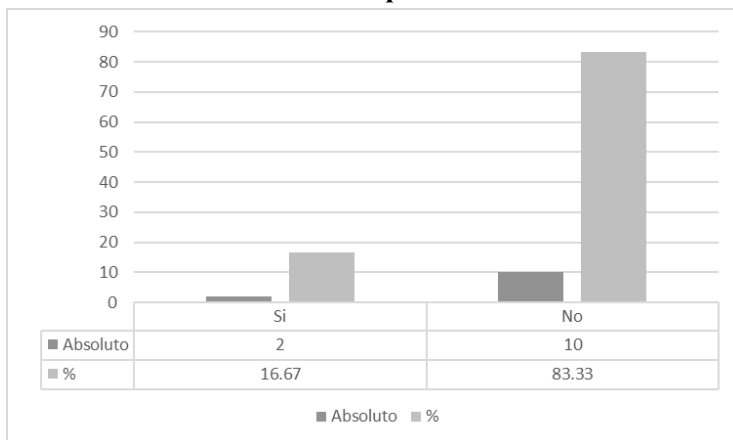
Primeramente y con el propósito de conocer el grado de conocimiento de las leyes y normas relacionadas con el cuidado del medio ambiente por parte de los agentes sociales en los niveles federal y estatal, se aplicó la siguiente pregunta: ¿mencione las principales leyes, reglamentos o normas que guiaron su desempeño para la restauración del agua contaminada del río Atoyac?, a la cual los ex funcionarios federales de CONAGUA, PROFEPA y SEMARNAT mencionaron respectivamente a la Ley de Aguas Nacionales (LAN), la Ley General de Equilibrio Ecológico, la Protección al ambiente (LGEEPA) y las normas oficiales mexicanas en materia de aguas residuales (NOM-001 SEMARNAT-1996 y NOM- 002 SEMARNAT-1996).

Por otro lado, los ex-funcionarios estatales de la Coordinación General de Ecología (CGE), la Secretaría de Salud-Organismo Público Descentralizado Salud de Tlaxcala, (SESA- OPD Salud), la Unidad de Servicios Educativos de Tlaxcala - Secretaría de Educación Pública del Estado (USET-SEPE), mencionaron a la Ley de Ecología y Protección al Ambiente del Estado de Tlaxcala, la Ley de Salud para el Estado de Tlaxcala y la Ley de Educación para el Estado de Tlaxcala, respectivamente.

Una vez que se constató la identificación mínima del marco legal y normativo en materia ambiental por parte de los ex-funcionarios federales y estatales, se procedió a indagar sobre la difusión de la misma con las autoridades locales, para lo cual se aplicó a quienes se habían desempeñado como autoridades municipales la siguiente interrogante: ¿alguna Institución federal o estatal, hizo de su conocimiento las leyes, reglamentos o normas

que deberían guiar su desempeño para evitar la contaminación de los recursos naturales en su municipio o comunidad, incluyendo el agua del río Atoyac? Obteniendo los siguientes resultados:

Figura 3. Difusión del marco legal ambiental a autoridades municipales



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

Una notable mayoría de los entrevistados contestaron negativamente, lo cual deja ver fallas en la comunicación y difusión de las reglas para el cuidado y preservación del ambiente en la zona de estudio, pero también el desconocimiento de las autoridades a nivel municipal de sus recursos de autoridad, lo cual se refleja en la falta de reglamentos y su aplicación para atender la problemática de la contaminación del río Atoyac en su demarcación.

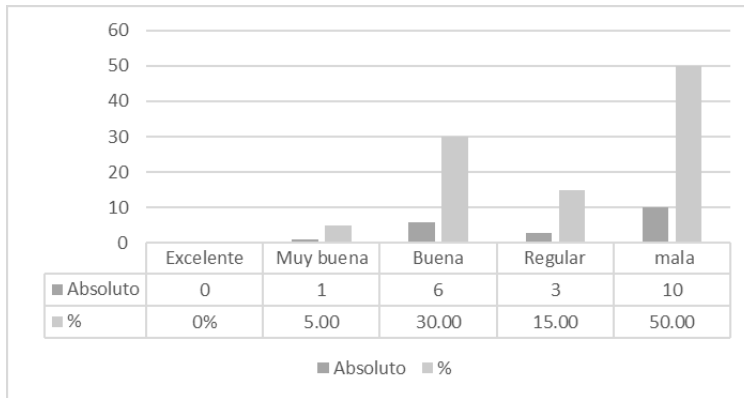
Ahora bien, en cuanto a los códigos de significación cabe destacar lo expresado por los ex titulares de Conagua, SEMARNAT y PROFEPA, al cuestionarles sobre la aplicación de la ley en la materia a la gran industria contaminante. El primero mencionó que siempre que se procedía a aplicar la ley mediante el inicio de un procedimiento o hasta la clausura de alguna empresa grande, se interponían amparos de las empresas a lo cual se agregaban “factores políticos” y “amiguismo” que

hacían que se recibieran “instrucciones desde México” para dar marcha atrás a dichos procedimientos, lo anterior coincide por lo expresado por el delegado de SEMARNAT, al señalar la existencia de “una política por parte del gobierno federal para favorecer a los empresarios” y que “esos arreglos políticos entre gobierno y grandes empresarios dejan fuera a las instituciones encargadas del cuidado y protección ambiental”, poniendo como ejemplo la relación del empresario de la mezclilla Kamel Nacif, con el gobierno de Puebla, el cual “intercedía ante el gobierno federal por este empresario ante cualquier intento de aplicar la ley a sus empresas”. Al respecto el ex delegado de PROFEPA coincide con los anteriores señalamientos al hablar de “concesiones a grupos de presión”.

La coordinación interinstitucional y la falta de recursos económicos

Con el propósito de conocer el nivel y calidad de la interacción de los diferentes agentes sociales, que tuvieron el papel de decisores en los gobiernos federal estatal y municipal, se aplicó el siguiente cuestionamiento: ¿cómo calificaría la coordinación interinstitucional con los demás órdenes de gobierno para la implementación de las acciones institucionales descritas anteriormente? Obteniendo lo siguiente:

Figura 4. Coordinación interinstitucional entre los diferentes órdenes de gobierno

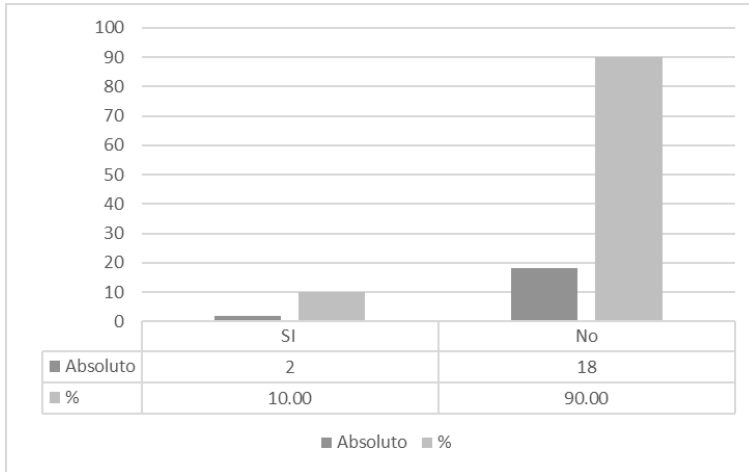


Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

Como puede apreciarse, la coordinación fue desde el punto de vista de la mayoría de los entrevistados como mala, destacando la respuesta del ex-delegado de SEMARNAT, quien a pesar de representar a una Dependencia considerada cabeza del sector ambiental, señala a los titulares de PROFEPA y CONAGUA en turno de “obstaculizar e impedir la actuación para la aplicación de la ley, lo cual resulta grave tomando en cuenta que la Conagua es la responsable de las aguas de ríos y la PROFEPA es normativa-punitiva”.

Otro aspecto que ha marcado la relación entre los gobiernos federal, estatal y municipal, es la falta de recursos económicos, para la implementación de programas, proyectos o acciones para la restauración del río Atoyac, reflejándose en los resultados de la siguiente pregunta aplicada a los ex-funcionarios y funcionarios públicos de los tres niveles de gobierno: ¿considera que el monto de los recursos económicos destinados a estos programas fue suficiente? Obteniendo los siguientes datos:

Figura 5. Suficiencia presupuestal para la implementación de programas o proyectos



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

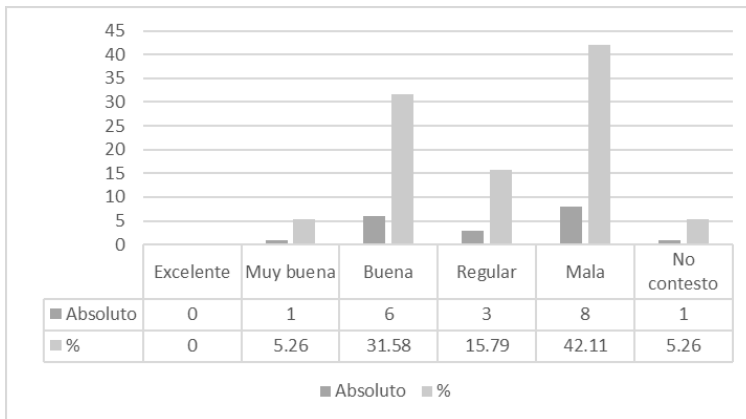
Al respecto cabe hacer mención que a lo largo de los años y sobre todo al inicio del período de gestión de los gobiernos en sus diferentes niveles, anuncian programas, proyectos y acciones, así como la firma de convenios de colaboración para el rescate del río Atoyac, estos no se concretan por aspectos como los mencionados por Rolando Romero López ex-delegado de SEMARNAT, al apuntar que en su gestión “no aceptaron hacer aportaciones los gobiernos locales” o el de Roberto Acosta Pérez, ex-coordinador de Ecología de Tlaxcala, que deja en claro la triste realidad en este rubro al señalar

“El convenio firmado en el 2000 entre el Gobierno Federal y el de los Estados de Puebla y Tlaxcala, tenía un programa específico donde se requería la construcción de nuevos sistemas y/o la rehabilitación de los sistemas de tratamientos existentes; en ese entonces la federación tenía los recursos suficientes para atender la problemática en un período de 10 años, el problema se dio en que los estados tenían que aportar 48 % del monto total y lamentablemente ninguna de las dos entidades involucradas tenían los recursos económicos que tenían que aportar”.

Vinculación y concertación con los sectores económico y social

En lo referente a la vinculación y concertación con los sectores económico y social del municipio de Tepetitla de Lardizábal, se desprenden como resultado de la aplicación de la siguiente pregunta: ¿cómo calificaría la estrategia de vinculación y concertación con los industriales de la mezclilla en sus diversos tamaños y con los demás sectores de la población de Tepetitla de Lardizábal en la implementación de programas y proyectos? Obteniendo los siguientes datos:

Figura 6. Vinculación y concertación del gobierno con los propietarios de talleres de mezclilla y demás sectores



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

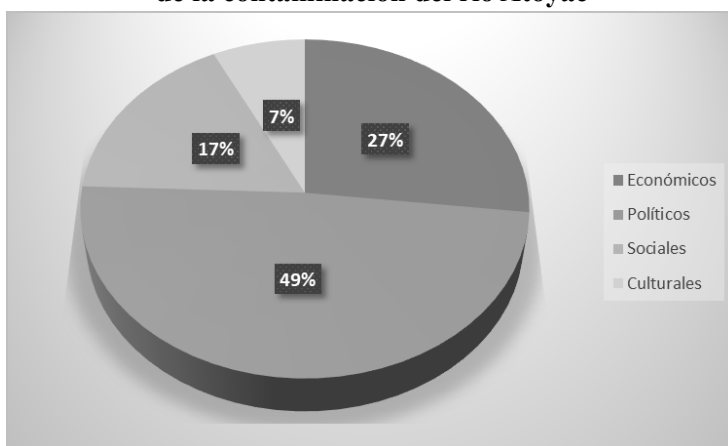
Si bien las cifras indican cierta polarización entre aquellos que la califican como mala y buena, es de resaltar que para el ex-director de local de Conagua en Tlaxcala, la relación siempre estuvo marcada por la “hostilidad” y la “violencia” de parte de los propietarios de los talleres de lavado de mezclilla ante cualquier intento por aplicar la ley en la materia a sus establecimientos, mientras que por el lado de los mezclilleros su dirigente acusa mala actitud por parte de representantes del gobierno que no ofrecen soluciones y, por el contrario en varias ocasiones han

realizado intentos de extorsión, favoreciendo una relación tensa, mientras que otros sectores como el agrícola definitivamente señalan desinterés del gobierno por resolver la contaminación del río Atoyac y las afectaciones que produce en sus cultivos.

Factores que favorecen la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala

Otro aspecto que resulta importante a destacar de este trabajo, es la ponderación de los factores que los agentes sociales consideran que contribuyen a reproducir la situación de contaminación del río Atoyac en la zona de estudio, los cuales se expresan en la respuesta al siguiente cuestionamiento: ¿desde su punto de vista que ha favorecido la reproducción de la problemática de la contaminación del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal? Obteniendo los siguientes datos:

Figura 7. Factores que han favorecido la reproducción de la contaminación del río Atoyac



Fuente: elaboración propia, con base en el trabajo de campo enero-julio 2021.

Cabe destacar que, entre los factores políticos, en orden de mención, se encontró a: la mala aplicación del marco regulatorio para sancionar a contaminadores, falta de voluntad política,

corrupción, omisión y descuido de autoridades, favoritismo a las grandes empresas, mala coordinación de dependencias, negligencia e irresponsabilidad del gobierno en sus tres niveles y exclusión de mezclilleros de San Mateo Ayecac en toma de decisiones. Entre los factores económicos se encontró el afán de la industria de la mezclilla por aumentar sus ingresos, falta de recursos económicos para solucionar el problema, negativa del gobierno estatal para aportar recursos económicos establecidos en convenios, actividad de la gran empresa foránea, actividad agrícola contaminante.

Referente a los factores tecnológicos se mencionan a la falta de tecnología, falta de plantas de tratamiento y falta de capacitación a empresas en la mitigación de sus procesos contaminantes. Finalmente, en los factores sociales, destacan la falta de cultura y educación ambiental, crecimiento de la población, falta de solidaridad y liderazgo, falta de cultura del tratamiento de aguas residuales, patrón cultural por contaminar, así como el desinterés y la indiferencia de la población.

Conclusiones

En la problemática de la contaminación del río Atoyac, se visibiliza una estructura en la que las reglas informales tienen mayor peso que las formales, dando lugar a prácticas caracterizadas por acuerdos al margen de la ley, entre agentes ubicados en los altos niveles gubernamentales con un sector de la gran industria que cuenta con poder económico y al mismo tiempo es altamente contaminante, constriñendo la acción de los agentes encargados de la aplicación de la ley para el cuidado y protección del ambiente, en el Estado de Tlaxcala, lo anterior aunado a una mala coordinación interinstitucional y de vinculación con los sectores económico y social locales, así como la falta de recursos económicos para implementar programas o proyectos de restauración, favorecen la producción y reproducción de la contaminación del agua del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal.

Se identifica que el origen de los diferentes tipos de contaminantes que se vierten al río Atoyac en Tepetitla de

Lardizábal, corresponde con prácticas sociales predominantes en diversas etapas de la actividad económica y social registradas a lo largo del tiempo en la zona, siendo la contaminación proveniente de la actividad industrial, la que se señala como más dañina.

A pesar de existir una percepción generalizada en los entrevistados que coincide en la gravedad de la contaminación proveniente principalmente de la actividad industrial, también se reconoce el predominio de prácticas sociales, cuya finalidad es el afán de obtener mayores ingresos económicos para su subsistencia, sin considerar las afectaciones al ambiente y los recursos naturales. Finalmente, en el cruce de acciones de los distintos agentes sociales en el marco de una estructura, se manifiesta la falta de información objetiva y de programas de concientización y educación ambiental sobre la problemática y sus efectos, lo cual aunado a la apatía y desinterés de la población impiden la restauración del río Atoyac en Tepetitla de Lardizábal.

Referencias bibliográficas

- Cambiasso, M. (2015). Consideraciones críticas sobre la teoría de la estructuración de Anthony Giddens. *Athenea Digital*, 15(3), 217-232. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/athenea.1406>
- Comisión Nacional de Derechos Humanos (2017). *Recomendación No. 10 /2017, CNDH*. https://www.cndh.org.mx/sites/default/files/doc/Recomendaciones/2017/Rec_2017_010.pdf
- Conoce San Martín Texmelucan (2021). <http://conocesanmartin.blogspot.com/2012/03/antigua-fabrica-textil-el-carmen.html>
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (1982). *Resolución de carácter general que concede en el corredor industrial Quetzalcóatl, en el Estado de Puebla, estímulos fiscales a las nuevas inversiones en actividades industriales prioritarias*. Secretaría de Gobernación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4708564&fecha=06/01/1982

- García, A. (2009). La teoría de la estructuración y su observación desde la acción: los límites del análisis. *Estudios sociológicos*, 79(XXVII).
- Giddens, A. (1976). *Las nuevas reglas del método sociológico, Crítica positiva de las sociologías comprensivas*. Amorrortu Editores.
- _____. (1984). *La Constitución de la Sociedad, bases para la teoría de la estructuración*. Amorrortu Editores.
- GREENPEACE (2014). *Ríos Tóxicos: Lerma y Atoyac Ríos tóxicos: Lerma y Atoyac. La historia de negligencia continúa*. <https://www.greenpeace.org/México/publicacion/952/ríos-toxicos-en-México/>
- Instituto Mexicano de Tecnologías del Agua (IMTA) (2005). *Informe anual 2005*. SEMARNAT-IMTA. <https://www.imta.gob.mx/images/pdf/informes-anuales/informe2005/presentacion.pdf>
- Montero, R. (2015). *Estudio de los factores que contribuyen al daño genotóxico en individuos expuestos a tóxicos ambientales. Determinación del riesgo a la salud de las comunidades que viven en la zona agrícola-industrial del límite entre Tlaxcala y Puebla*. Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM. <https://www.biomedicas.unam.mx/personal-academico/regina-dorinda-montero-montoya/>
- Proposición con punto de acuerdo sobre la planta de Pemex en San Martín Texmelucan, en el estado de Puebla (2001, 8 de marzo). Cámara de Diputados. *Gaceta Parlamentaria*, 703(IV). <http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/58/2001/mar/20010308.pdf>
- Rodríguez, L. y Morales, J. A. (2014). *Contaminación del Atoyac daños ambientales y tecnologías de mitigación*. UAM-Maporra.
- Tribunal Latinoamericano del Agua (2006). *Caso: Contaminación industrial en los ríos Atoyac y Xochiac. Estados de Tlaxcala y Puebla. República Mexicana, Veredictos de la Audiencia Pública Regional*. <http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/04/R%C3%ADo-Atoyac-final.pdf>

CAPÍTULO 7. PROPUESTA DE UN “MODELO INTEGRAL DE RESTAURACIÓN SANITARIA Y ECOLÓGICA”

José Fernando Baquero Herrera¹
Víctor Hugo Rodríguez Obregón²
Herminia Soledad Cerda y Meneses³

Introducción

La comunidad de estudio, San Mateo Ayecac, se encuentra localizada en el municipio de Tepetitla de Lardizábal, en el Estado de Tlaxcala en una extensión territorial de 77 hectáreas. En 2020, de acuerdo a información del INEGI, San Mateo Ayecac registró una población de 4,401 habitantes, quienes representan el 20 % de la población total del municipio, que es de 22,274. Del total de población de San Mateo Ayecac, 1,235 son menores de 0-14 años, 2,941 tienen entre 15-64 años y 225 son mayores de 65 años.⁴ Adicionalmente, se estima que la localidad tiene una población flotante de alrededor de 600 personas, quienes laboran en esta población, lo que la eleva a un aproximado de 5,000 personas.⁵

Las principales actividades económicas de la comunidad son la agricultura, la ganadería, el comercio y la maquila de

¹ Profesor-Investigador Titular de Programas Especiales en CIDETEQ, correo-e: fbaquero@cideteq.mx

² Profesor-Investigador Asociado en la Dirección de Tecnología de CIDETEQ, correo-e: vrodriguez@cideteq.mx

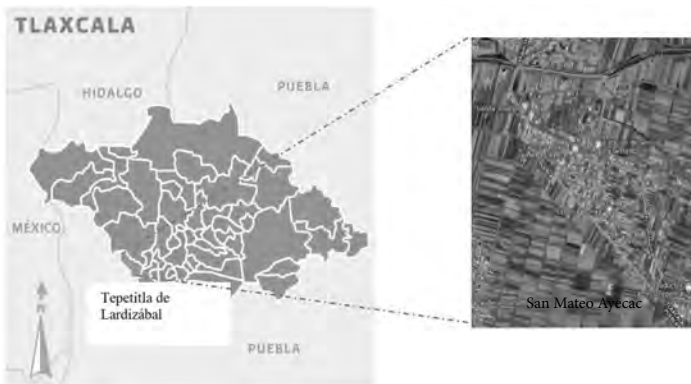
³ Coordinadora de Transferencia de Tecnología en CIQA, correo-e: herminia.cerda@ciqa.edu.m

⁴ <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=290190007>

⁵ <https://www.marketdatamexico.com/es/articulo/Perfil-sociodemografico-Colonia-San-Mateo-Ayecac-Tepetitla-Lardizabal-Tlaxcala>

ropa, especialmente de mezclilla. En esta última actividad San Mateo Ayecac es considerada el centro de operaciones de ocho comunidades de Puebla y Tlaxcala. Por su parte, es importante señalar que el sector público en conjunto, a través de 3 entidades públicas emplean a 382 personas. Estas entidades son la Secretaría de Educación Pública, la Unidad de Servicios Educativos de Tlaxcala y el Organismo Público Descentralizado de Tlaxcala.⁶

Figura 1. San Mateo Ayecac, Municipio de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala



Fuente: INAFED.

La ubicación geográfica estratégica de San Mateo Ayecac, le ha permitido acceder a una infraestructura insertada en una red carretera lo que ha impulsado el crecimiento del comercio local y regional. Finalmente, cabe señalar que San Mateo Ayecac, se localiza en una región rural-urbana altamente dinámica, cercana a áreas de vocación industrial y de dos zonas de importante influencia, la de Puebla-Tlaxcala y la zona Metropolitana de la Ciudad de México, las cuales generan una influencia en la zona, al ser una importante fuente de la inserción laboral de una parte de la población, en los sectores industrial y terciario ya que

⁶ <https://www.marketdatamexico.com/es/article/Colonia-San-Mateo-Ayecac-Tepetitla-Lardizabal-Tlaxcala>

la actividad agrícola y ganadera esta aún activa en la zona de estudio.

En San Mateo Ayecac, de acuerdo al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) se encuentran un total de 240 establecimientos, de los cuales 125 corresponden a la categoría de comercio al por menor, 59 a la industria manufacturera y 56 a otros servicios (excepto actividades gubernamentales). Los comercios minoristas generan alrededor de \$117 millones de pesos mexicanos en ingresos anuales y emplean alrededor de 260 personas. San Mateo Ayecac tiene un output económico estimado en \$330 millones de pesos mexicanos anuales, de los cuales \$150 millones corresponde a ingresos generados por los hogares y unos \$180 millones a ingresos de los 200 establecimientos que allí operan⁷. La diversidad de establecimientos en San Mateo Ayecac puede observarse en la Figura 2.

Del total de población ocupada en el ámbito municipal, la ligada a la industria es la que tiene el porcentaje más alto de ocupación, alcanzando un 37 %, seguida por la empleada en el sector comercio y servicios (32 %). En el ramo industrial, es reconocida la existencia de la industria subsectorial ligada a los talleres de mezclilla.

⁷ <https://www.marketdatamexico.com/es/article/Perfil-sociodemografico-Colonia-San-Mateo-Ayecac-Tepetitla-Lardizabal-Tlaxcala>

Figura 2. Diversidad de establecimientos de la comunidad de San Mateo Ayecac



Fuente: MarketDataMéxico.

Los rangos de edad que permiten visualizar las generaciones que han conformado la red de conocimientos ligados a la industria de la mezclilla, oscilan entre 35 años la edad mínima y 70 la máxima, proporción que corresponde a por lo menos dos generaciones inmiscuidas en dicho proceso. El marco del nuevo modelo que se propone, debe tomar en consideración la zona de estudio, zona en la cual dejó de ser preponderante la fuerza laboral especializada, dando paso a aquella población de multiactividad, donde cobran protagonismo las relaciones rurales-urbanas, acentuadas en México entre 1980 a 1990 (Hernández, 2017), periodo que coincide con la naciente industria del taller familiar rural.

Diagnóstico de la situación actual

El estado de Tlaxcala es en sí, una referencia del proceso señalado en el párrafo anterior, enmarcado por un modelo de capital regional en simultáneo con la movilidad demográfica, composición económica y geografía del Estado. Se promovió el debilitamiento del ramo agrícola y ganadera, frente a la industria y a los servicios (Hernández y Orozco, 2017), lo cual implicó para el ámbito laboral, la intensificación de la multiactividad en el ámbito rural. Al ser afectada la relación entre industria y territorio, se generaron procesos que modificaron la estructura, en los cuales en territorio se favoreció el empleo no agrícola, los microemprendimientos y otras formas de autoempleo.

El impacto socioambiental que tuvo la introducción de la industria de la maquila de confección de pantalones de mezclilla en Tepetitla de Lardizábal, cabecera municipal de San Mateo Ayecac, es un factor clave. El análisis reportado por (Vallejo, 2016), presenta elementos para discutir la reconversión productiva de los espacios rurales, sus causas y efectos en la población y en el ambiente; así como el reconocimiento del papel de los actores e instituciones involucradas en la comprensión de la problemática, no solo de carácter ambiental, sino política, socioeconómica y en algunos casos de salud pública.

La agudización del grado de deterioro del río Atoyac está estrechamente relacionada con la proliferación de una industria que realiza descargas de aguas residuales, así como el laxo o nulo seguimiento histórico, al cumplimiento de las regulaciones en materia de agua por parte de los distintos niveles de gobierno. Particularmente, en la industria textil y de confección, representada por cientos de talleres familiares creados en el municipio, que operan en su mayoría de modo informal e incluso clandestino y que como se ha visto, es una industria que está en constante crecimiento en la zona, ya que, donde antes había tierras de cultivo hoy son zonas de maquila y confección de mezclilla.

La misma autora, señala, que dichos talleres se conforman en el principal patrimonio económico de la localidad y, para la mayoría de los pobladores, es la única fuente de empleo de la

familia, en sustitución del ciclo agrícola. Por ello, el tema de la contaminación y sus efectos en la salud y el ambiente genera posiciones divididas y conflictos internos entre los habitantes, lo que dificulta la búsqueda de soluciones bajo consenso.

Además de las descargas industriales, el río recibe también las aguas negras de los drenajes municipales, así como los fertilizantes y plaguicidas utilizados en las zonas agrícolas, que llegan a través de los escurrimientos y arrastres pluviales. Esta polución afecta diversos componentes del medio: desde la fauna acuática, el aire y los suelos, hasta la salud de los pobladores. Pero dado que sus fuentes son tan distintas resulta complicado encontrar una solución a corto plazo.

Los efectos de la contaminación del río Atoyac en la salud

En la salud humana, la contaminación del río Atoyac ha generado serios problemas. El estudio realizado por Morales (2010), advirtió afecciones a la salud en comunidades de Tlaxcala y Puebla aledañas al río. El autor señala que a partir de 2002 se comenzó a percibir el incremento de enfermedades como leucemia linfoblástica, púrpura trombocitopénica y anemia hemolítica. Otros estudios refieren la presencia de sustancias como blanqueadores clorados, hidróxido de sodio, benceno, acrilonitrilo, metanol, tolueno, plomo, arsénico, ésteres y cloruro de vinilo, algunas de ellas consideradas tóxicas y cancerígenas para los seres humanos. Además, las mayores concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (cloruro de metileno y cloroformo) se encontraron en los afluentes municipales, por lo que es probable que provengan de las descargas clandestinas de los pequeños talleres de mezclilla, así como de otro tipo de industrias (Morales, 2010; Arellano-Aguilar et al., 2015).

La población más vulnerable a la inhalación crónica de compuestos tóxicos como el cloruro de metileno y el cloroformo, es la que habita en las orillas de los canales abiertos que recorren las comunidades, así como los agricultores. Respecto de estos últimos, se debe mencionar que, aun cuando el uso de aguas negras para el riego de los cultivos, ha sido una práctica común por varias décadas, en los últimos años algunos agricultores han

dejado de hacerlo para evitar dificultades en la comercialización de sus productos, pues el consumidor conoce de su origen.

Diversos estudios a nivel mundial han demostrado que la contaminación del agua puede provocar un sinnúmero de enfermedades en las poblaciones cercanas a los cuerpos de agua, incluso algunas tan graves como el cáncer (Rodríguez-Tapia et al., 2012). Sin embargo, existe muy poca información sobre la forma en la que las sociedades valoran el costo de tener un ambiente limpio de contaminantes y libre de enfermedades. Es por ello que para tener una dimensión cuantitativa de los daños que causa la contaminación del río Atoyac se deberían valorar los daños a la salud de la población como lo ha reportado dicho autor.

Fundamentación teórico-conceptual

México, y en general América Latina, ha sido fuertemente impactada por la globalización, con una importante crisis social, económica y política, golpeada históricamente por la desalineación de sus políticas públicas y por frágiles reformas estructurales de corte neoliberal, que no han logrado reducir la pobreza ni la desigualdad, ni tampoco ha mejorado la calidad de vida de la mayoría de la población. Se ha podido observar que las medidas políticas impuestas a través de los años han impactado fuertemente a las economías en desarrollo, puesto que estas medidas se han concentrado específicamente en el crecimiento económico, aislando las prioridades sociales y ambientales. Las consecuencias han sido los desequilibrios y desigualdades regionales, la profundización de la pobreza y la devastación de los recursos naturales.

Elementos del desarrollo para la construcción de un Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica

Las actuales condiciones que amenazan el entorno como el cambio climático, degradación ambiental, y problemas socioeconómicos, hacen que surja la necesidad de nuevas formas de incentivar el desarrollo, con una nueva perspectiva de integración de

las diferentes organizaciones e instituciones, que permita la participación local de todos los agentes y sujetos económicos, sin pretensiones de poder político. La protección ambiental y el desarrollo sostenible deben considerarse como parte integral de las agendas de todas las instituciones gubernamentales, y de la mayoría de las instituciones privadas, tanto nacionales como internacionales.

El nuevo estilo de desarrollo deberá estar basado en la viabilidad económica, social y ecológica de las actividades económicas que se consideren. Por ejemplo, si una técnica de manejo de un recurso natural es beneficiosa ecológicamente, para una región en particular, pero conlleva problemas de distribución del ingreso o pérdida económica a los que se benefician o son dueños de ese recurso, tal manejo no será sostenible (Segura, 2002).

De tal forma, lo que se pretende entonces es un control local sobre el desarrollo y una vinculación y articulación entre las políticas económicas, sociales y ambientales, que supone a la vez la articulación de los medios apropiados para alcanzar las opciones escogidas en armonía con el quehacer social y los recursos de la propia comunidad. Este *Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica* pretende entonces desde su implementación a escala local, un control sobre el desarrollo, una vinculación y articulación entre las políticas económicas, sociales y ambientales y los medios apropiados para implementar alternativas de solución a dichas problemáticas (proyectos), en consonancia con el quehacer social de la comunidad.

Las políticas erradas fundamentadas en el crecimiento económico y la deficiente capacidad gubernamental de las décadas pasadas, han contribuido a generar desastres ambientales como el caso de estudio. Es por ello que el desarrollo comunitario, aparece como un mecanismo de defensa ante circunstancias que se consideran coyunturales y se centra en la continuidad de sus propios proyectos, la ejecución de políticas de protección a sectores de la economía que se encuentran en desventaja en terminos económicos, sociales, culturales, incluyendo de salud pública.

Elementos provenientes del entorno de la comunidad involucrada

El desarrollo comunitario, viene a ser un concepto en el que las comunidades implementan sus propias propuestas, es decir, el liderazgo nace en la comunidad madura organizada y comprometida, que trasciende y en donde las decisiones parten de su propia reflexión. Es la búsqueda de la satisfacción de las necesidades básicas definidas en su entorno, la participación de la población objetivo, la protección del ambiente y la identificación de la comunidad en un espacio determinado (Catalano, 2005).

Es entonces cuando el desarrollo propio de una comunidad se convierte en motor de nuevos procesos de definición del bienestar para la región. Postula como meta la autonomía en diversos ámbitos estratégicos, tales como energía, tecnología, formación y alimentación; a través del desarrollo de una infraestructura industrial y empresarial eficiente y comprometida con el ambiente.

Las políticas de desarrollo propio tienen su fundamento en una gestión descentralizada, que se hace operativa como una política pública para superar la desigualdad social, y generar al mismo tiempo la inclusión de los diferentes actores sociales y gubernamentales en el proceso de transformación del Estado y sus regiones.

El desarrollo sostenible, solamente es viable mediante la conjunción del crecimiento económico, la equidad, el equilibrio ambiental y la eficiencia y responsabilidad de las instituciones públicas. Es indispensable que los programas económicos, políticos y sociales del País, adopten una perspectiva de largo plazo y que sean resultado del mayor consenso posible entre los diferentes actores de la sociedad (Enkerlin, Cano y Garza, 1997).

Bajo este contexto un desarrollo y una planificación que sea asumida responsablemente, que se centre en la persona, que involucre a actores clave representativos de la población, conocedores del entorno local, que sean capaces de provocar un cambio cultural; es la necesaria garantía para generar esas características que se constituyen en bases sólidas para el desarrollo regional sustentable (Ramírez, 2000).

En suma, se debe impulsar la integración y regionalización como el eje central en las políticas de desarrollo sostenible y diseñar la política de desarrollo socioeconómico y ambiental coherente basada en la sustentabilidad y bienestar social equitativo de acuerdo a la realidad social, económica y política del entorno en cuestión.

Elementos provenientes de la política económica gubernamental

Los modelos económicos implementados en México desde la década de los 70, con el modelo de industrialización de sustitución de importaciones y otras medidas de ajustes estructurales, han profundizado los problemas socioeconómicos y ambientales ya que las metas de prosperidad se han concentrado en el crecimiento económico, dejando en un deprimido nivel de importancia el bienestar, la calidad de vida y el medio ambiente, entre otros temas. De manera histórica, no solo en Tlaxcala, las actividades del hombre bien sean sociales, políticas, culturales y sobre todo económicas han repercutido sobre el medio ambiente y sus recursos naturales. Desde hace varios años dichas actividades han estado reguladas por normas y leyes que tienen la intención de minimizar el impacto de estas actividades y tratar de conseguir un equilibrio en esta convivencia con el entorno. Sin embargo, de manera adicional a dichos ordenamientos de naturaleza superior, resulta importante que las políticas y programas públicos y finalmente la legislación aplicable, partan de la clara identificación de los problemas o situaciones que se intentan modificar y de manera particular en el tema del uso, aprovechamiento, tratamiento y descargas de aguas en todo el estado.

En esta nueva visión amplia de desarrollo, se deben formular y aplicar políticas de manera integral, de manera que se favorezca el bienestar de las personas a través de la mejora en su calidad de vida, logrando de así el desarrollo regional propio sustentable. Es indispensable entonces, tener presente que el desarrollo económico en el territorio pasa a ser entonces un acto consciente, el cual requiere del acuerdo de todos los actores involucrados. Estos, al asumir el reto, propician cambios en la

base productiva territorial. Tales actos van asociados a la creación de un tejido productivo local diversificado, que deseablemente pudiera apoyarse en la ciencia y en la tecnología, a través de redes formales de innovación. Estas redes, en consecuencia, van a necesitar una presencia estatal diferente, menos intervencionista y más inductora y facilitadora. Se trata entonces de incrementar la productividad basada en el uso racional de los recursos e impactos ambientales, por medio de *la diversificación e innovación* de los procesos productivos (desde un enfoque técnico-ambiental) que sumen a su estado de bienestar.

Elementos provenientes del marco jurídico y evaluación de políticas y programas públicos

Cuando existe un problema o necesidad de carácter público, los recursos con los que cuenta el Estado deben ser utilizados de manera eficaz y eficiente, ya que las administraciones públicas cuentan con recursos limitados, por lo que, el criterio de máxima eficacia-eficiencia debe prevalecer en la acción pública en donde el propósito sea maximizar los beneficios y condiciones de la población. En este mismo orden de ideas, la Constitución Política Mexicana en el artículo 134 establece que los recursos económicos de que dispongan la Federación, las Entidades Federativas, los Municipios y las Demarcaciones Territoriales, se administrarán con eficiencia, eficacia, economía, transparencia y honradez para satisfacer los objetivos a los que estén destinados. De igual forma en el párrafo sexto del artículo cuarto Constitucional establece que

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

Es por ello por lo que en el Programa Nacional Hídrico 2020-2024, derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 se refrendan los compromisos de México en materia de derechos humanos al agua y saneamiento, sin dejar de lado otros derechos, como la salud y el medio ambiente. En este ordenamiento también se establecen los compromisos que en los diversos tratados, convenios y convenciones como la Convención Americana sobre los Derechos Humanos (Pacto de San José), los convenios de la OIT (Organización Internacional del Trabajo) y los Protocolos Facultativos sobre los derechos civiles y políticos, México ha refrendado en materia de agua y saneamiento.

Como lo indica Ballart (1993), el concepto de evaluación ha evolucionado paulatinamente para abarcar todas las etapas de una política o programa público, a fin de identificar e implementar acciones de mejora, no solo cuando los productos, servicios o acciones ya fueron entregados o ejecutados, o hasta que sea posible medir los resultados o impactos como sugieren los conceptos tradicionales, sino en etapas puntuales y bien definidas en todas las fases del ciclo de política pública que permitan reorientar los cursos de acción. En este sentido como lo dice (Roth, 2002), la evaluación debería ser considerada por el poder político como un aporte en el proceso de decisión y no como un contrapoder que busca entorpecer su acción, tanto a nivel político como en las comunidades o zonas de influencia.

De igual forma, se considera necesario retomar el concepto establecido por (Cardozo, 2006) el cual establece que la Nueva Gestión Pública (NGP) es un conjunto de decisiones y prácticas administrativas orientadas a flexibilizar estructuras y procesos e introducir mayor competencia en el sector público, con el propósito de mejorar los resultados de la acción del Gobierno, para lograr un óptimo desempeño. En este sentido, este tipo de gestión busca alcanzar el mayor valor público y beneficio para la población y esto incluye también la elaboración de leyes, reglamentos y cualquier otro instrumento jurídico que el estado pueda desarrollar como apoyo a la ejecución de las políticas y programas públicos.

Aun en el país, es necesario una mejor articulación entre las políticas públicas, programas, la asignación del presupuesto,

no tanto respecto al desarrollo de instrumentos, indicadores o técnicas de gestión, sino más bien respecto a la clara caracterización de los grandes problemas locales de la región, ya que, en términos generales, la problemática como la del agua es compleja y su atención trasciende sexenios. Por otra parte, el aspecto teórico, formal o normativo y la realidad operativa en donde intervenga de manera activa la ciudadanía, sigue siendo poca, y las decisiones generalmente se llevan a cabo de manera unilateral (Provencio, 2003).

Elementos provenientes de la agricultura e industrialización

De manera particular, el estado de Tlaxcala presenta una serie de problemas ambientales entre los que destacan el deterioro de los bosques, la pérdida de la biodiversidad, la erosión del suelo, los fertilizantes y plaguicidas utilizados en las zonas agrícolas, el riego con aguas contaminadas, el cambio de uso de suelo, el acelerado crecimiento de la mancha urbana, el deterioro de los principales cuerpos de agua, la presión que sufren los ecosistemas, la generación de basura y su depósito en terrenos y barrancas, la emisión de contaminantes a la atmósfera por vehículos automotores y procesos industriales.

En el tema de agua, el estado de Tlaxcala y en específico la región de San Mateo Ayecac, se requiere desde hace años de un adecuado tratamiento de los efluentes y del cuerpo de agua del río Atoyac. La realización de diferentes acciones, algunas de ellas enfocadas en el sistema de agua potable y drenaje, así como la rehabilitación de plantas de tratamiento, muchas de ellas dejadas en administración a los municipios, sin los recursos necesarios para su operación y la vigilancia más estricta del cumplimiento de la normatividad en materia ambiental en los sectores agrícolas y empresarial, contribuirían de manera importante a la reducción de la contaminación existente, y otro tipo de padecimientos ya reportados en la literatura y en éste libro, padecimientos que en algunos casos hubieran sido evitables.

Ante dicho escenario es que las empresas deberán integrarse a la sociedad más allá de su concepción como unidades económicas, bajo una nueva cultura de responsabilidad social

corporativa, que buscan generar valor compartido, entendido el término desde el punto de vista financiero, pero también social y medioambiental.

En la medida en que exista un involucramiento del sector empresarial en este modelo, esta filosofía podrá incorporarse entre los diversos procesos que la integran, al grado de poder convertirse en algunos casos como un estándar de desempeño. Esto contribuye a la homologación de buenas prácticas, en los sectores agropecuario y de la industria de la mezclilla. De manera adicional, las empresas son fuente y atracción de recursos para el aprovechamiento de nuevas oportunidades y en algunos casos pueden convertirse en modelos a seguir por otros sectores industriales de la misma región, tamaños de industria e incluso personas, lográndose un efecto multiplicador

Elementos provenientes de la Academia. Las humanidades, la ciencia y la tecnología

Es en la convergencia de las humanidades, la ciencia y la tecnología y sus diversas metodologías para el entendimiento del entorno y del comportamiento, donde pueden generarse propuestas de análisis y solución que deben ser confrontadas con la realidad de la sociedad que lo demanda. Es una comunidad fuente de conocimiento, pasado, presente y futuro, ya que proporciona diferentes herramientas de análisis de los factores sociales, culturales, económicos, técnicos y políticos que intervienen sobre una problemática, de acuerdo a la situación y contexto de la propia comunidad, siendo por lo tanto fundamental su participación para el desarrollo sustentable.

Si bien es cierto que la academia cuenta con las herramientas para proponer alternativas actualizadas de solución, es la comunidad quien conoce su entorno, para poder adoptar la más pertinente de las soluciones propuestas y hacerlas propias. Una academia deseable para este modelo es aquella que tiene libertad de pensamiento, creatividad, seria y sin estar sujeta a alguna ideología, lo cual permita ser un elemento crítico de control, orientación y objetividad en el modelo.

Propuesta de un “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”

A lo largo de la historia, también es posible observar ejemplos de políticas, programas y por ende legislaciones, en donde lo que se ha establecido, dista mucho de las realidades que se viven en las comunidades. No se parte de un diagnóstico claro de las problemáticas existentes, no solo a nivel efecto, sino también respecto al entorno en donde se gesta la problemática (social, cultural, económico, demográfico, etcétera). En este sentido, un aspecto importante que permite identificar si las actividades que en dicha materia se realizan son adecuadas y sobre los cuales también existe información suficiente en diversas oficinas públicas, son los ejercicios de evaluación de políticas y programas públicos ya planteados y/o ejecutados. Conocer y analizar esta información, tomando como referencia diversos indicadores de desempeño y otras herramientas de gestión; permitirá rescatar puntos de partida, que, bajo los ajustes necesarios, incluyendo los elementos aportados en este trabajo, podrían lograr el impacto esperado.

Por esta razón, solo mediante una interacción integral y articuladora entre los diferentes tipos de políticas públicas se puede construir un “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”, que promueva el desarrollo de localidades como la de San Mateo Ayecac, propiciando así, una mayor participación de la comunidad y coordinación con las organizaciones participantes de los diferentes niveles de gobierno e incluso el sector privado. Esta requerirá de una voluntad política concertada y que los gobiernos locales actúen de manera coordinada con el gobierno federal, y el monitoreo y supervisión periódica de un comité de vigilancia ciudadana caracterizado por su independencia y su interdisciplinariedad.

Para lograr buenos resultados, debe considerarse una estrategia regional en que se coordinen e interactúen los elementos de todos los involucrados (ver Figura 3) y en donde el entorno que propicia la convergencia de los diferentes elementos del modelo, es aquel que tiene influencia en algún sentido para el saneamiento del río Atoyac. La interacción entre el sector empresarial formal

e informal, la comunidad ribereña, las instituciones del estado y el sector académico, confluyen en la generación de una cartera de proyectos focalizados en la restauración sanitaria y del ecosistema del río, como se representa en el Esquema 1.

Esquema 1. Componententes fundamentales del “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”



Fuente: elaboración propia.

El empoderamiento e integración social de la comunidad o población objetivo se considera como relevante y crítica. Es bien conocido de experiencias de iniciativas en donde se involucran informalmente a la sociedad civil organizada; sin embargo, con el paso del tiempo y los años, todo queda en iniciativas interesantes, pero no trascendentes, no sustentables, gran parte de ellas con una visión de corto plazo. Es por ello, que se requerirá de una adecuada, integrada y consensuada planificación estratégica de largo plazo, que aborde sus riesgos y necesidades, basada en la viabilidad económica, social y ecológica. Por lo tanto, se requiere la integración de políticas de desarrollo regional bajo un concepto interdisciplinario e interinstitucional. Esta planificación requerirá de objetivos de desarrollo comunal que podrían incluir estrategias autónomas de desarrollo urbano, rural e intercomunal, que despierten la conciencia de desarrollo sostenible por medio de la capacitación continua y de la formación ambiental en todos los sectores de la población.

Como se ha descrito en este documento, la región de San Mateo Ayecac, es una zona relevante para el desarrollo

de actividades agrícolas y, en las últimas décadas, también comerciales e industriales, destacando la manufactura de mezquilla con su respectivo grado de impacto en el medio ambiente, en especial en el tema del uso y contaminación del agua. Este caso podría ilustrar la necesidad de la reflexión y el consenso de la propia comunidad sobre cómo priorizar los proyectos que den solución a las afectaciones de las aguas contaminadas del tratamiento de la mezquilla sobre los canales de riego agrícola (cultivo, ganadería) y que están ambos necesariamente asociados a actividades de supervivencia de dicha comunidad. Además de otros aspectos culturales, usos y costumbres, conciencia ambiental, etcétera.

El propósito de este modelo será la institucionalización de la integración social, ya que permitirá a la población objetivo o comunidad una apropiación del logro, impulsando que dicha integración perdure en generaciones futuras, que serán los actores de dar continuidad a la evolución de su localidad hacia el desarrollo sustentable y hacia su bienestar. El siguiente paso importante será lograr construir un portafolio de “Proyectos focalizados de restauración sanitaria y ecología del río Atoyac” priorizados por la comunidad y expresados conforme a un mapa de ruta, con una perspectiva a largo plazo y que tenga como meta el bienestar social y el equilibrio ambiental. Se debe entonces, instalar un sistema regional de planificación y presupuestos con una clara definición de criterios temáticos para la formulación y priorización de proyectos.

La selección, aplicación y seguimiento de políticas sociales, económicas y ambientales integradas; requiere la construcción de indicadores específicos, que se hagan cargo tanto de las métricas de la capacidad del grupo integrado para lograr las metas, de las acciones de corrección que deban ejecutarse durante el desarrollo de los proyectos y de las acciones mejora en el desempeño de los diferentes procesos involucrados.

Resultados y discusión de la operación del modelo

Como se puede observar, la interacción de los actores a través del modelo propuesto, permitirá generar y adoptar una cartera de

proyectos de mejora que atiendan a las problemáticas de mayor relevancia de acuerdo a la propia percepción y administración de la comunidad, con el fin de que tal apropiación, permita que el modelo funcione más allá de los cambios en las administraciones gubernamentales.

Los elementos operativos que despliegan el “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”, conceptualizados en el Esquema 1, parten del diagnóstico local de la región en consideración que da lugar a una planificación de proyectos de restauración consensuados y priorizados. Las subsecuentes etapas de ejecución, se incluyen también en el despliegue del diagrama operativo del modelo, mostradas en la Figura 4. Estos se consideran, como los elementos mínimos para su implementación de manera dinámica y virtuosa en un marco de mejora continua. La descripción del diagrama se describe a continuación según sus etapas:

Planificación

a) Diagnóstico del entorno/macro/local

Corresponde a una actividad inicial, un elemento de entrada para la planificación. Es posible hacer uso de información previa de diferentes fuentes primarias o secundarias. En su desarrollo el papel de la comunidad es crítico, ya que permitirá priorizar gran parte de la información disponible y canalizar los esfuerzos hacia las problemáticas reales alrededor del tema de uso y contaminación del agua que afectan el entorno de San Mateo Ayecac. Por lo tanto, la participación de la comunidad debe ser activa en cada una de las diferentes actividades (conceptualización, diseño e implementación de la solución), así como un cambio real de actitud, pasando de una comunidad receptora- pasiva de productos o servicios a una comunidad integrada por sujetos activos de su propio desarrollo. En la elaboración de este diagnóstico, también se podrán sumar esfuerzos de instituciones de educación superior, centros de investigación y algunas otras entidades públicas y privadas asociadas a la naturaleza del

problema o necesidad que se pretende resolver y que pueden ser entes catalizadores y quienes integren los diagnósticos.

Esquema 2. Elementos operativos del “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”



Fuente: elaboración propia.

El diagnóstico del entorno deberá considerar también restricciones y riesgos que se encuentren fuera del entorno local y que pudieran afectar la ejecución del proyecto, siendo necesario el plantear y realizar las actividades adecuadas para evitar que estos riesgos se materialicen, además de proponer un plan de mitigación para los riesgos latentes.

b) Definición de programas de largo aliento

Programas transexenales o en una línea de tiempo de mediano y largo plazo, dependiendo la complejidad del problema a resolver. En esta etapa, es necesario definir un programa particular de la zona, haciendo uso de herramientas de gestión como pudiera ser el análisis de riesgo, matriz FODA, resultados de evaluaciones

previas, entre otros, los cuales permitirán contar con elementos de priorización para la realización de los programas.

c) Planteamiento de proyectos alineados a las necesidades del entorno

Los proyectos por considerar deberán presentar una alineación con la priorización de las necesidades fruto del diagnóstico realizado y que ha sido validado por la comunidad. Tendrán una serie de elementos mínimos que permitan brindar claridad a la problemática que el proyecto desea resolver tras su ejecución, con la finalidad de que pueda ser posible evaluarlo de manera objetiva por un comité ciudadano, acompañado de autoridades de los diferentes niveles de gobierno. Estos proyectos permitirán definir un mapa de ruta crítica alcanzable, orientada al logro y a la atención de las problemáticas identificadas. En el desarrollo de estos proyectos podrán utilizarse diferentes metodologías, como por ejemplo la Metodología del Marco Lógico, que pueden contribuir a identificar cada elemento de la estrategia, los resultados esperados del proyecto e indicadores asociados.

d) Presupuestación y asignación de recursos para el desarrollo del proyecto

Los presupuestos para los proyectos comunitarios deberán estar presupuestados a finales de cada año para su ejercicio e integración en el presupuesto del año en curso en el cual se pretende desarrollar el proyecto. La presupuestación anticipada permitirá su asignación de manera previa de tal forma que se garantice la disponibilidad de recursos. El diagnóstico, los proyectos y el presupuesto asociado, deberán formar parte integral de las políticas públicas de los diferentes niveles de gobierno y una vez autorizados, no podrán ser susceptibles de recortes presupuestales. Con lo anterior se pretende dar un impulso y continuidad a los esfuerzos, que en materia ambiental deben ser visualizados como esfuerzos transexenales dada su complejidad.

e) Definición de objetivos y métricas a alcanzar mediante el desarrollo del proyecto (cualitativos/cuantitativos) de naturaleza económica, social, ambiental, etcétera

Todo proyecto deberá tener una métrica asociada para la medición de su progreso/avance y a diferentes niveles, asociados a su naturaleza. Los impactos del proyecto deberán ser integrales, es decir, no solo en el ámbito económico, social, sino también ambiental y de sustentabilidad, ser pertinentes, precisos y tener una capacidad de medición orientada a la problemática identificada. Dicha métrica deberá contribuir a modificar de manera positiva la matriz de riesgos.

Ejecución

El desarrollo del proyecto debe llevarse a cabo de conformidad con lo planificado, tomando en cuenta las buenas prácticas de administración de proyectos que apliquen dada la naturaleza del proyecto y en las cuales el personal participante, deberá contar con una formación suficiente al respecto para poder desempeñar sus actividades de manera adecuada y en cada una las etapas del proyecto. Cabe señalar que, en dichos proyectos, es posible privilegiar la participación de la comunidad en la proveeduría, mano de obra o la provisión de algún otro elemento natural, lo cual, de manera indirecta, representaría un beneficio dual.

Verificación

La gestión de este modelo integral de restauración quedará a cargo de un grupo multidisciplinario que tenga como base estar integrado por personas de la comunidad en donde se presente la problemática y podrán incorporarse actores del sector público y privado.

Deberá realizarse un seguimiento/monitoreo y evaluación en cada una de las etapas del proyecto, poniendo un especial énfasis en el adecuado ejercicio de los recursos y transparencia en su ejecución, existiendo comités de vigilancia ciudadana, temporales y no permanentes, acompañados de una autoridad

federal o municipal independiente a la región, con lo anterior se pretende garantizar la objetividad y gestión de los riesgos asociados. En este sentido es importante destacar que las mediciones o verificaciones que se realicen del proyecto pudieran incluir mediciones duras, como ya se ha establecido en el presente capítulo y mediciones blandas que pudieran incluir entrevistas de percepción, encuestas, focus group, entre otras metodologías que pudieran representar una mayor interacción con la comunidad respecto al progreso y/o resultado de los avances realizados a través del proyecto y que complementen con información cualitativa los resultados alcanzados.

Mejora

El reto consiste en que represente un ejercicio serio y a conciencia, no laxo, de aprendizaje (lecciones aprendidas que incluya los éxitos como los fracasos) y teniendo como bases hechos específicos basados en evidencia, ya que permite identificar desviaciones y corregirlas (en objetivos, instrumentos, tiempos, etcétera) y en particular institucionalizar dichos cambios, con la intención de mejorar la eficiencia en la definición y aplicación de políticas y programas públicos. El comunicar los resultados del proyecto, así como las recomendaciones para la mejora es algo que tiene que dialogarse con la comunidad y de ser posible, si se cuenta en ese momento con un plan de acción específico que atienda dichas problemáticas que se derivaron de la ejecución del proyecto, también difundirse. Es recomendable preparar diferentes tipos de informes considerando a los diversos auditorios que se pudieran tener. Finalmente, la difusión y transparencia que se haga de todo este proceso de la ejecución de los proyectos comunitarios y los resultados de los mismos afianzaran la confianza de la comunidad en el despliegue del Modelo dinámico de restauración focalizada.

Conclusiones

En este capítulo, se comparte una visión que propone un “Modelo integral de restauración sanitaria y ecológica”, que puede ser

aplicado a la Comunidad de San Mateo Ayecac como propio, dadas sus particularidades respecto al uso y contaminación del agua del río Atoyac y sus actividades económicas de influencia en la región. Específicamente a la convivencia entre dos grandes actividades productivas que hacen uso y/o tienen algún impacto sobre el deterioro del río, la actividad agropecuaria y la industria textil, en específico la actividad del teñido de mezclilla. Durante el desarrollo del modelo se han puesto en contexto las características sociales, económicas, ambientales y culturales de la localidad, las cuales en conjunto inciden sobre la problemática identificada y deben ser consideradas para el despliegue del modelo para y su solución.

Para la adopción del modelo resulta crítica la participación activa, el involucramiento, sensibilización y capacitación de la comunidad, ya que este se centra en los individuos, los cuales se constituyen en los agentes de cambio que trascienden cualquier nueva iniciativa incluso periodos gubernamentales. Son los miembros de la comunidad los que conocen y viven la problemática y deben ser parte activa de la solución e interactuar con diferentes actores públicos y privados, considerando que la contaminación del río Atoyac es un problema complejo, de antaño y que requiere de un compromiso, esfuerzo permanente, arduo y sobre todo de un mapa de ruta en ejecución, evolución y mejora continua.

La identificación clara y sencilla de la problemática particular de cada comunidad ribereña, la no dispersión de metas, recursos para los proyectos de restauración priorizados y consensuados entre los diferentes actores, con el apoyo un comité de transparencia y vigilancia ciudadana, permitirá alcanzar metas graduales que contribuirán al saneamiento del río, sin dejar de lado los aspectos ambientales, sustentables y de desarrollo económico.

Finalmente, la participación del gobierno, en sus tres niveles será de gran importancia para este Modelo, ya que será el catalizador que impulsa la iniciativa para que los otros tres actores se vinculen y generen propuestas de proyecto que en un mediano y largo plazo redunden en bienestar para la comunidad. Además, el gobierno podrá impulsar las leyes y regulaciones

que faciliten y promuevan las propuestas planteadas por la comunidad, academia y empresas.

Referencias bibliográficas

- Arellano-Aguilar, O., Solís-Ángeles, S., Serrano-García, L., Morales-Sierra, E., Méndez-Serrano, A. y Montero-Montoya, R. (2015). Use of the Zebrafish Embryo Toxicity Test for Risk Assessment Purpose: Case Study. *Journal of Fisher Sciences*, 9(4), 52-62.
- Ballart, X. (1993). Evaluación de políticas (Marco conceptual y organización institucional). *Revista de estudios políticos*, 80, 199-224.
- Cardozo, M. I. (2006). *La evaluación de políticas y programas públicos. El caso de los programas de desarrollo social en México*. Porrúa.
- Catalano, C. D. (2005). Desarrollo Endógeno, ¿Cuánto Sabemos? *Revista económica, INIA divulga*.
- Comisión Estatal de Agua de Tlaxcala (CEAT) (2013). *Resultados de monitoreos mensuales de los análisis de calidad del agua*.
- Enkerlin, E., Cano, J., Garza, R. A. y Vogel, E. (1997). *Ciencia Regional y Desarrollo Sostenible*.
- Hernández, C. y Orozco, A. (2017). Las empresas flexibles de autopartes y su localización en el estado de Tlaxcala. *Nósis. Revista de ciencias sociales y humanidades*, 26(52), 48-75.
- Morales, E. (2010). Casos de daño a la salud por contaminación en los estados de Tlaxcala y Puebla. En Pérez Argüelles, M. (Coord.). *Cinco miradas sobre el derecho a la salud. Estudios de caso en México, El Salvador y Nicaragua*. (Pp. 231-290). Fundar, Centro de Análisis e Investigación.
- Provencio, E. (2003). Política económica, alternativa y sustentabilidad del desarrollo. *Economía informa*, 316.
- Ramírez, M. (2000). Los Complejos Desafíos de la Planificación del Desarrollo Regional. Ministerio de Planificación y Cooperación, MIDEPLAN.

- Rodríguez-Tapia, L., Zavala-Vargas, P. y Morales-Novelo, J. A. (2012, febrero-marzo). Evaluación socioeconómica de daños ambientales por contaminación del río Atoyac en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, (III), 143-151.
- Roth, A. N. (2002). *Políticas Públicas “Formulación, implementación y evaluación”*. Ediciones Aurora.
- Segura, O. (2002). *Desarrollo Sostenible y Políticas Públicas en Centroamérica*. Centro Internacional en Política Económica, Universidad Nacional de Costa Rica.
- Vallejo, J. (2016, julio-octubre). Talleres de mezcla y transformaciones socioambientales en un municipio rural. El caso de Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México. *Sociedad y Ambiente*, 4(11), 68-91.



CAPÍTULO 8. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS POTENCIALES PARA LA REGENERACIÓN DE LA CUENCA ALTO ATOYAC

S. Alejandro Lozano Morales¹
Raúl Herrera Mendoza²
Gregorio Cadenas Pliego³
Yolanda Reyes Vidal⁴
Fernando Felipe Rivera⁵
Christian Javier Cabello Alvarado⁶

Introducción

El deterioro ambiental que se vive en nuestra sociedad actual en gran parte ha sido ocasionado por el llamado cambio climático. Con respecto a esto, uno de los sistemas más sofocados y que resulta de vital importancia para mantener el equilibrio ecológico-ambiental es lo concerniente al sistema hídrico global, el cual, ha sido devastado hasta alcanzar índices de contaminación preocupantes. Como respuesta a esta situación se han propuesto alternativas tecnológicas bastante prometedoras mediante la

¹ Investigador por México CONACyT-CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: alejandro.lozano@ciqa.edu.mx

² Profesor-Investigador CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: raul.herrera@ciqa.edu.mx

³ Profesor-Investigador CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: gregorio.cadenas@ciqa.edu.mx

⁴ Investigadora por México CONACyT-CIDETEQ. Querétaro, correo-e: mreyes@cideteq.mx

⁵ Investigador por México CONACyT-CIDETEQ. Querétaro, correo-e: frivera@cideteq.mx

⁶ Investigador por México CONACyT-CITLAX-CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: christian.cabello@ciqa.edu.mx



implementación de tecnologías electroquímicas disponibles, como son procesos electroquímicos de oxidación avanzada, electrocoagulación y procesos bioelectroquímicos; y también el uso de la nanotecnología, desde la perspectiva del diseño, preparación y caracterización de nanomateriales combinados con sistemas híbridos en procesos de adsorción físico/química y óxido-reducción química, principalmente. Por ende, esta sección describe solo algunas de las tecnologías a nivel global para la regeneración de agua. Por lo tanto, las actividades que proponen este tipo de soluciones tecnológicas resultan alentadoras; que, si bien son complejas, esto no debería minimizar su aplicación potencial. En otras palabras, como decía Hipócrates: “a grandes males, grandes soluciones”.



8.1. ADSORCIÓN DE COLORANTES DE AZUL DE METILENO Y ALGUNOS OTROS CONTAMINANTES EN AGUAS

C. J. Cabello-Alvarado⁷
G. Cadenas-Pliego⁸

Nanopartículas modificadas y no modificadas para la adsorción de azul de metileno

En la actualidad la contaminación del agua es un problema serio a nivel mundial. Uno de los sectores que contribuye más a esta contaminación es el industrial, debido al uso de diversas sustancias químicas en los procesos de producción y teñido, ya que libera una cantidad importante de contaminantes a los efluentes de agua. Los tintes se consideran uno de los principales contaminantes que pueden afectar al medio ambiente, esto cuando están presentes más allá del límite de la concentración permitida (Swarnkumar y Osborne, 2020).

Los colorantes son compuestos orgánicos que pueden encontrarse en diferentes fuentes industriales tales como la industria química, pintura, textil, alimenticia, cosmética, farmacéutica, entre otras (Bhattacharya y Sharma, 2005; Chandra et al., 2007; Haque et al., 2011). Los colorantes sintéticos que se utilizan con mayor frecuencia a nivel industrial son nitrados, azoicos, índigos, azufrados, fosforados y de antraquinona. Aproximadamente existen 10,000 tipos de colorantes que se

⁷ Investigador por México CONACyT- CITLAX-CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: christian.cabello@ciqa.edu.mx

⁸ Profesor-Investigador CIQA. Saltillo, Coahuila, correo-e: gregorio.cadenas@ciqa.edu.mx

fabrican en el mundo (Carneiro et al., 2007; Combes y Haveland-Smith, 1982).

Entre los colorantes con mayor toxicidad se encuentra el azul de metileno (MB), el cual es un tinte catiónico básico que se utiliza para teñir seda, algodón, lana, entre otros tipos de telas. Cuando las personas están expuestas a este tipo de colorante en aguas residuales puede ocasionar trastornos de salud graves, como vómitos, náuseas, dificultad para respirar y diarreas agudas. Debido a esta situación es conveniente estudiar métodos para la degradación o inactivación de este colorante en aguas residuales (Moreno y Hormaza, 2012).

Algunas de las técnicas que se pueden emplear para eliminar este y otros colorantes que se encuentran en aguas residuales, son la ultrafiltración, ozonización, ósmosis inversa, intercambio iónico, oxidación química, fotodegradación, degradación electroquímica y adsorción. Para la adsorción existen diferentes tipos de materiales que pueden utilizarse, actualmente las nanopartículas y nanocompuestos han llamado la atención debido a que por su tamaño < 100 nm poseen gran área superficial y mejor efectividad en comparación con los adsorbentes de tamaño micrométrico, con esto pueden interactuar con otras moléculas químicamente (Liu et al., 2012; Zielinska-jurek et al., 2012; Gómez-Pastora et al., 2014).

Las partículas de carbono son muy utilizadas como adsorbentes debido a sus propiedades de densidad, resistencia a la tracción, elasticidad, capacidad de transporte de corriente estimada, emisión de campo, transmisión de calor y estabilidad térmica (Menéndez-Díaz y Martín-Gullón, 2006; Wu et al., 2021). La adsorción de MB en los materiales de carbono se puede clasificar en base a si son excelentes o pobres, debido a su área superficial y la estructura de los poros del carbono. Además de tomar en cuenta el área de la superficie y la estructura de los poros, la adsorción de este colorante puede también ser influenciada por el tamaño de partícula, la acidez de la superficie y la funcionalidad que afecta la interacción entre el MB y el carbono (Ghaedi et al., 2014).

Los materiales carbonosos conforme la capacidad de absorción de MB se pueden clasificar en cuatro grupos;

adsorbentes superiores (capacidad de adsorción superior a 1000 mg / g), excelente adsorbente (de 500 a 1000 mg / g), adsorbente moderado (de 100 a 500 mg / g), poco absorbente (menos de 100 mg / g) (Liu et al., 2012). Cuando se modifica la superficie de un material carbonoso puede atraer con mayor facilidad moléculas orgánicas adhiriéndose a su superficie (Andrade-Guel et al., 2019; Cabello-Alvarado et al., s.f.).

Algunos grupos funcionales superficiales ayudan considerablemente a mejorar la adsorción de MB. El azul de metileno contiene un anillo aromático de 6 carbonos, nitrógeno y azufre en su estructura molecular. Estos elementos pueden interactuar con la superficie del carbono mediante interacciones electrostáticas, formación de puentes de hidrógeno y relación entre el donante y el aceptor de electrones (Padhi et al., 2016).

Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono pueden ser de pared sencilla o pared múltiple (Cabello et al., 2017). Existen estudios con MWNTC para adsorber este tipo de contaminantes. Se han estudiado nanotubos de carbono magnéticos de paredes múltiples (MMWCNT) con diferentes diámetros, estos MMWCNT se pueden separar fácilmente del agua después de la adsorción. La capacidad máxima de adsorción de MB alcanzó 204.2 mg/g, los valores disminuyeron con el aumento de los diámetros consecuencia de la disminución del área superficial, se utilizaron durante 6 ciclos sin una pérdida significativa de la capacidad de adsorción (Song et al., 2021). Nanotubos de carbono de pared múltiple se han funcionalizado con L-tirosina (CNT-TYR) para eliminar MB. Se observó que se produjo una adsorción > 95% a pH 6, temperatura de 25 ° C y 7 min. La adsorción máxima alcanzada fue de 440 mg g⁻¹.

Los resultados revelaron que el modelo de Langmuir se ajustaba mejor a los datos obtenidos ($R^2 > 0.99$) que los otros modelos, que indicaban adsorción en monocapa mediante quimisorción. La razón de la alta capacidad de adsorción de CNT-TYR se explica por los diferentes tipos de interacciones,

como la interacción electrostática, π - π y los enlaces de H (Saxena *et al.*, 2020).

Se realizaron estudios de nanopartículas de cerio soportadas en MWNTC a través de un método asistido por microondas. Se evaluó la eficacia de adsorción de estos materiales utilizando MB. Los nanocompuestos producidos mostraron mayor capacidad de adsorción de colorante y porcentaje de eliminación de 95.3%. El modelo de isoterma de Langmuir indicó el mejor ajuste de los datos de adsorción en equilibrio. Se vio reflejado que un aumento de la temperatura incrementa la capacidad de adsorción del compuesto (López-Tinoco *et al.*, 2021).

Otro tipo de estudios que se han llevado a cabo son MWTNC con funcionalidad amino (MWCNT-NH₂) para adsorber selectivamente contaminantes organoclorados de soluciones acuosas. Resultando que este tipo de materiales exhiben una cinética de captura ultrarrápida (96.5% eliminado en 30 s), donde una alta tasa de absorción (98.5%), una capacidad de absorción sobresaliente (197.9 mg g⁻¹), se conserva a pH 2 hasta 10. Además de servir como material adsorbente y estos materiales funcionalizados también son una buena opción para el desarrollo de sensores, detectores y eliminadores de compuestos dañinos (Jia *et al.*, 2021).

Grafenos

El grado de oxidación del óxido de grafeno y su capacidad de adsorción para la eliminación de MB al oxidar el grafito con KMnO₄ se ha estudiado con buenos resultados. Los estudios revelaron que el grado de absorción de MB aumentaba exponencialmente con el grado de oxidación del óxido de grafeno. Se ha informado que la modificación del grafito con óxidos metálicos TiO₂, MgO, Fe₃O₄ y nanotubos de carbono forman compuestos de óxido de metal/grafito que pueden ser buenos adsorbentes de contaminantes en agua (Ghaed *et al.*, 2014).

Nanofibras de carbono

Para la adsorción de contaminantes orgánicos, las nanofibras de carbono han llamado el interés como alternativa relativamente económica a los nanotubos de carbono. Se han fabricado nanofibras de carbono (CNF) mediante electrohilado partir de poliacrilonitrilo (PAN). Este proceso es seguido de una carbonización y oxidación mediante tratamiento con una mezcla de H_2SO_4/HNO_3 , para purificar o quitar remanentes de dichas estructuras. Este tipo de materiales se utilizaron como nanoadsorbentes para la adsorción de MB de una solución acuosa. La funcionalización de CNF mejoró la capacidad de adsorción para el tinte MB al compararlos con las fibras sin modificar. La isoterma de adsorción se ajusta mejor al modelo de Langmuir. Los resultados termodinámicos mostraron que la adsorción de MB en las nanofibras de carbono electrohiladas y oxidadas fue endotérmica y espontánea (Thamer et al., 2019).

Nanoarcillas

Otras partículas que se han utilizado para la adsorción de colorantes son las nanoarcillas, esto debido a su estructura y porosidad (Sarkar et al., 2020). También existen membranas a base de PVA con nanoarcillas para la adsorción eficaz de MB del medio acuoso. La membrana exhibe una excelente eficiencia de remoción (99.5%) para MB en las condiciones óptimas tales como dosis de nanoarcilla = 6% en peso, concentración inicial de colorante = 10 ppm, tiempo de contacto = 240 min, pH = 10 y temperatura = 30 ° C. Los resultados revelaron que el proceso de adsorción podría describirse bien con los modelos de isoterma de Freundlich y Langmuir. Este tipo de membranas presentaron buenas características antibacterianas y de reutilización (Radoor et al., 2020).

Otro tipo de materiales que se han obtenido para la adsorción de contaminantes son películas de nanocompuestos híbridos de polisulfona-harina de madera/nanoarcilla (PSWF / nanoarcilla) preparadas por mezclado en solución. Las propiedades de absorción y difusión de agua a largo plazo, se determinaron

sumergiendo los compuestos en agua a temperatura ambiente durante varias semanas. Se adsorbió más MB a pH más alto, tiempos de contacto más prolongados y cargas de los materiales de refuerzo más altas; sin embargo, las temperaturas más altas aplicadas afectaron negativamente a la adsorción (Alosaimi et al., 2020).

Se han reportado membranas de microfiltración de nanoarcillas cerámicas que poseen bajo costo obtenidas mediante prensado en seco, este tipo de membranas se fabricaron con zeolita natural como formador de poros. La membrana de zeolita al 30% se seleccionó para la microfiltración de azul de metileno, violeta cristal y naranja de metilo a partir de soluciones acuosas. El azul de metileno y el violeta cristal son colorantes catiónicos debido a la presencia de $\text{NC}(\text{CH})^{3+}$ mientras que el naranja de metilo tiene un grupo funcional SO_3^- que es un aniónico. La membrana tenía carga negativa a $\text{pH} = 6$, lo que sugiere la adsorción de colorantes catiónicos como mecanismo de eliminación.

Se obtuvo una remoción del 90.23% de azul de metileno en condiciones óptimas con una concentración de 35.76 mg L^{-1} y una presión transmembrana de 1.5 bar. Sin embargo, se obtuvo menos del 10 % de eliminación de naranja de metilo, debido a su carga negativa. Las membranas se pueden recuperar completamente eliminando los tintes adsorbidos mediante un tratamiento térmico a 300°C durante 1 h (Foorginezhad y Zerafat, 2017). Se prepararon hidrogeles super-adsorbentes de poli (acrilamida-co-ácido itacónico) / nanoarcilla mediante polimerización por radicales libres in situ de acrilamida y ácido itacónico en un medio acuoso con nanoarcilla como reticulante. El efecto del tiempo sobre la adsorción de diferentes tintes fue casi el mismo. Los materiales obtenidos pueden considerarse un buen candidato para aplicaciones ambientales para retener más agua y eliminar tintes (Sonawane et al., 2009; Marandi et al., 2015).

Fotocatálisis en el tratamiento de aguas

Recientemente, los procesos de oxidación avanzados (POA) han atraído mucha atención para eliminar los contaminantes tóxicos

de las aguas residuales sin usar productos químicos o gases nocivos. La fotocatalisis, entre todos los POA, se considera un proceso ecológico, sostenible y energéticamente eficiente que se puede emplear para descomponer cantidades altas/bajas de contaminantes orgánicos recalcitrantes sin formar derivados tóxicos. En la Tabla 1 se presenta una revisión reciente de estudios relacionados con fotocatalisis empleada en la purificación del agua.

Tabla 1. Estudios de fotocatalisis en el tratamiento de aguas

Catalizador	Soporte	Contaminante	Referencia
ZnO	Nylon 6	Bacterias y AM	(Andrade-Guel et al., 2021)
Fe ₃ O ₄ /AC/TiO ₂	Carbón activado	AM	(Moosavi et al., n.d.)
Óxidos metálicos	Geo-polímeros	Colorantes	(Falah & Mackenzie., n.d.)
Fe ₂ TiO ₅	Nanopartícula	AM	(Vasiljevic et al., 2020)
TiO ₂	Polímero	Prozac	(Moreira et al., 2020)
Biopolímeros	Nanofibra	Colorantes y metales	(Gauss et al., 2021)
Óxidos metálicos	Polioxometalatos	Colorantes, pesticidas y otros	(Lan et al., 2021)
TiO ₂ -Materiales	Varios	Antibióticos	(Kutuzova et al., 2021)
Metales y otros	Puntos de carbono	Colorantes, antibióticos y otros	(Akbar et al., 2021)
Se NPs	Nanopartícula	Colorantes y bacterias	(Menon et al., 2021)
TiO ₂	Polímeros conductores	Contaminantes orgánicos	(Abdelnasser et al., 2021)
TiO ₂ , ZnO	Polímeros termoplásticos	Contaminantes orgánicos	(Cantarella et al., 2021)
Fe (0)	Polipirrol	Malachita	(HASPULAT et al., 2021)
Óxidos: Ti, Al, Au, B, Bi, Fe, Li y Zr	Polímeros	Colorantes Azo	(Feng et al., 2021)
Metales, OMT, etc.	Varios	Contaminantes Orgánicos	(Bisaria et al., 2021)

SiO ₂	Nanopartícula	Naranja de metilo y AM	(Biradar et al., 2021)
Metales dopados	Partícula	Colorantes azules	(Ray, 2021)
ZnO	Nanopartícula	orgánicos y metales	(Aremu et al., 2021)
ZnO-Grafeno	Nanocompuesto	orgánicos e inorgánicos	(Albiter et al., 2020)
Mono y bimetalicos óxidos	Derivados de carbono	Colorantes	(Ahuja et al., 2021)

Fuente: elaboración propia.

Se han evaluado una amplia variedad de óxidos, sulfuros, materiales carbonosos, polímeros microporosos conjugados y otros, buscando la mayor fotoactividad, selectividad y estabilidad, además de utilizar la luz visible como fuente de activación. Los óxidos de metales de transición (OMT) como el dióxido de titanio (TiO₂), el óxido de zinc (ZnO), el óxido de hierro (Fe₂O₃) y óxido de magnesio (MgO) se han explorado ampliamente en aplicaciones fotocatalíticas para la remediación del agua. Entre ellos, el más utilizado es el TiO₂ debido a su estabilidad fotoquímica, inercia química y ecológicamente benigna. El azul de metileno (BM), un tinte catiónico, se usa más comúnmente como agente colorante para el algodón, la lana y la seda. En general es uno de los colorantes más usados en la actualidad, presenta impactos negativos en seres humanos y animales. Varios estudios se han realizado para tratar de eliminar este colorante de aguas debido a que representa una gran preocupación desde el punto de vista humano y ambiental.

Referencias bibliográficas

- Abdelnasser, S., Al Sakkaf, R. y Palmisano, G. (2021). Environmental and energy applications of TiO₂ photoanodes modified with alkali metals and polymers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104,873. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2020.104873>
- Ahuja, P., Kumar Ujjain, S., Kanojia, R., Attri, P. y Tornabene, F. (2021). *Transition Metal Oxides and Their Composites*

- for Photocatalytic Dye Degradation*. <https://doi.org/10.3390/jcs5030082>
- Akbar, K., Moretti, E. y Vomiero, A. (2021). *2100532 (1 of 18) Carbon Dots for Photocatalytic Degradation of Aqueous Pollutants: Recent Advancements*. <https://doi.org/10.1002/adom.202100532>
- Akerdi, A. G. y Bahrami, S. H. (2019). Application of heterogeneous nano-semiconductors for photocatalytic advanced oxidation of organic compounds: A review. *In Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103283>
- Albiter, E., Merlano, A. S., Rojas, E., Barrera-Andrade, J. M., Salazar, Á. y Valenzuela, M. A. (2020). *Synthesis, Characterization, and Photocatalytic Performance of ZnO-Graphene Nanocomposites: A Review*. <https://doi.org/10.3390/jcs5010004>
- Alosaimi, A. M., Hussein, M. A., Abdelaal, M. Y., Sobahi, T. R. y Rozman, H. D. (2020). Polysulfone/wood flour/organoclay hybrid nanocomposites as efficient eco-friendly materials. *Composite Interfaces*, 27(8), 717-736. <https://doi.org/10.1080/09276440.2019.1692615>
- Andrade-Guel, M., Ávila-Orta, C. A., Cabello-Alvarado, C., Cadenas-Pliego, G., Esparza-González, S. C., Pérez-Alvarez, M. y Quiñones-Jurado, Z. V. (2021). Non-Woven Fabrics Based on Nanocomposite Nylon 6/ ZnO. *Ultrasound-Assisted Extrusion for Improved Antimicrobial and Adsorption Methylene Blue Dye Properties*. <https://doi.org/10.3390/polym13111888>
- Andrade-Guel, M., Cabello-Alvarado, C., Cruz-Delgado, V. J., Bartolo-Perez, P., De León-Martínez, P. A., Sáenz-Galindo, A., Cadenas-Pliego, G. y Ávila-Orta, C. A. (2019). *Materials Surface Modification of Graphene Nanoplatelets by Organic Acids and Ultrasonic Radiation for Enhance Uremic Toxins Adsorption*. <https://doi.org/10.3390/ma12050715>
- Aremu, O. H., Akintayo, C. O., Naidoo, E. B., Nelana, S. M. y Ayanda, O. S. (2021). Synthesis and applications of nano-sized zinc oxide in wastewater treatment:

- a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-03069-1>
- Babu, D. S., Srivastava, V., Nidheesh, P. V. y Kumar, M. S. (2019). Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment*, 696, 133,961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133961>
- Bhattacharya, K. G. y Sharma, A. (2005). Kinetics and thermodynamics of Methylene Blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder. *Dyes and Pigments*, 65(1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2004.06.016>
- Biradar, A. I., Sarvalkar, P. D., Teli, S. B., Pawar, C. A., Patil, P. S. y Prasad, N. R. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using one-step synthesized silica nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2,832-2,838. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.11.946>
- Bisaria, K., Sinha, S., Singh, R. y Iqbal, H. M. N. (2021). Recent advances in structural modifications of photo-catalysts for organic pollutants degradation – A comprehensive review. *Chemosphere*, 284, 131,263. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131263>
- Cabello-Alvarado, C., Andrade-Guel, M., Pérez-Alvarez, M., Cadenas-Pliego, G., Cortés-Hernández, D. A., Bartolo-Pérez, P., Ávila-Orta, C. A., Cruz-Delgado, V. J. y Zepeda-Pedreguera, A. (s.f.). *Graphene Nanoplatelets Modified with Amino-Groups by Ultrasonic Radiation of Variable Frequency for Potential Adsorption of Uremic Toxins*. <https://doi.org/10.3390/nano9091261>
- Cabello, C., Bartolo, P., Rincón, S., Cabañas, D. y Zepeda, A. (2017). Modification of multi-walled carbon nanotubes with 1,4-diaminobutane dihydrochloride through heating at reflux. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 25(6), 348-354. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2017.1305357>
- Cai, W., Wei, J., Li, Z., Liu, Y., Zhou, J. y Han, B. (2019). *Preparation of amino-functionalized magnetic biochar*

with excellent adsorption performance for Cr(VI) by a mild one-step hydrothermal method from peanut hull. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.11.062>

- Cantarella, M., Impellizzeri, G., Mauro, A. Di, Privitera, V., Carroccio, S. C. y Stadler, F. J. (2021). *Polymers Innovative Polymeric Hybrid Nanocomposites for Application in Photocatalysis.* <https://doi.org/10.3390/polym13081184>
- Carneiro, P. A., Nogueira, R. F. P. y Zanoni, M. V. B. (2007). Homogeneous photodegradation of C.I. Reactive Blue 4 using a photo-Fenton process under artificial and solar irradiation. *Dyes and Pigments*, 74(1), 127-132. <https://doi.org/10.1016/J.DYEPIG.2006.01.022>
- Chandra, T. C., Mirna, M. M., Sudaryanto, Y. y Ismajji, S. (2007). Adsorption of basic dye onto activated carbon prepared from durian shell: Studies of adsorption equilibrium and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 127(1-3), 121-129. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2006.09.011>
- Chang, Z. (2011). “Firecracker-shaped” ZnO/polyimide hybrid nanofibers via electrospinning and hydrothermal process. *Chemical Communications.* <https://doi.org/10.1039/c0cc05634k>
- Chen, B., Chen, Z. y Lv, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Chen, Q., Zheng, J., Yang, Q., Dang, Z. y Zhang, L. (2019). *Insights into the Glyphosate Adsorption Behavior and Mechanism by a MnFe₂O₄@Cellulose-Activated Carbon Magnetic Hybrid.* *ACS Applied Materials and Interfaces.* <https://doi.org/10.1021/acsami.8b22386>
- Chenab, K. K., Sohrobi, B., Jafari, A. y Ramakrishna, S. (2020). Water treatment: functional nanomaterials and applications from adsorption to photodegradation. *Materials Today Chemistry*, 16, 100,262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100262>

- Cheng, S., Liu, F., Shen, C., Zhu, C. y Li, A. (2019). A green and energy-saving microwave-based method to prepare magnetic carbon beads for catalytic wet peroxide oxidation. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.049>
- Colmenares, J. C., Varma, R. S. y Lisowski, P. (2016). Sustainable hybrid photocatalysts: titania immobilized on carbon materials derived from renewable and biodegradable resources. *Green Chemistry*, 18(21), 5,736-5,750. <https://doi.org/10.1039/C6GC02477G>
- Combes, R. D. y Haveland-Smith, R. B. (1982). A review of the genotoxicity of food, drug and cosmetic colours and other azo, triphenylmethane and xanthene dyes. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology*, 98(2), 101-243. [https://doi.org/10.1016/0165-1110\(82\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0165-1110(82)90015-X)
- Do Minh, T., Song, J., Deb, A., Cha, L., Srivastava, V. y Sillanpää, M. (2020). Biochar based catalysts for the abatement of emerging pollutants: A review. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124856>
- Dong, C. Di, Chen, C. W. y Hung, C. M. (2017). *Synthesis of magnetic biochar from bamboo biomass to activate persulfate for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments. Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.204>
- Elizalde-González, M. P. y Lozano-Morales, S. A. (2019). Composite functioning as trap of photoproducts: TiO₂ nanobelts anchored to carbon particles. *Materials Chemistry and Physics*, 228, 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.02.014>
- Elsellami, L., Dappozze, F., Houas, A. y Guillard, C. (2017). Does water in synthesized TiO₂ have an effect on the photocatalytic activity? Towards a spectacular response. *Materials Letters*, 204, 188-191. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.06.010>
- Falah, M. y Mackenzie, K. J. D. (s.f.). *catalysts Photocatalytic Nanocomposite Materials Based on Inorganic*

- Polymers (Geopolymers)*. <https://doi.org/10.3390/catal10101158>
- Feng, C., Zhou, J., Xu, X., Jiang, Y., Shi, H. y Zhao, G. (2021). Performance Study of Grass-Derived Nano-Cellulose and Polycaprolactone Composites for 3D Printing. *Applied Sciences*, 11(3), 1,273. <https://doi.org/10.3390/app11031273>
- Foorginezhad, S. y Zerafat, M. M. (2017). Microfiltration of cationic dyes using nano-clay membranes. *Ceramics International*, 43(17), 15,146-15,159. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.08.045>
- Fröhlich, A. C., Foletto, E. L. y Dotto, G. L. (2019). Preparation and characterization of NiFe₂O₄/activated carbon composite as potential magnetic adsorbent for removal of ibuprofen and ketoprofen pharmaceuticals from aqueous solutions. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.037>
- Fu, H., Ma, S., Zhao, P., Xu, S. y Zhan, S. (2019). Activation of peroxymonosulfate by graphitized hierarchical porous biochar and MnFe₂O₄ magnetic nanoarchitecture for organic pollutants degradation: Structure dependence and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.207>
- Gauss, C., Pickering, K. L. y Muthe, L. P. (2021). The use of cellulose in bio-derived formulations for 3D/4D printing: A review. *Composites Part C: Open Access*, 4, 100,113. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100113>
- Ghaedi, M., Ghazanfarkhani, M. D., Khodadoust, S., Sohrabi, N. y Oftade, M. (2014). Acceleration of methylene blue adsorption onto activated carbon prepared from dross licorice by ultrasonic: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2,548-2,560. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2013.10.039>
- Haham, H., Grinblat, J., Sougrati, M. T., Stievano, L. y Margel, S. (2015). *Engineering of iron-based magnetic activated carbon fabrics for environmental remediation*. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma8074593>

- Han, L., Xue, S., Zhao, S., Yan, J., Qian, L. y Chen, M. (2015). Biochar supported nanoscale iron particles for the efficient removal of methyl orange dye in aqueous solutions. *PLoS ONE*, 10(7), 1-15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132067>
- Han, Z., Sani, B., Mrozik, W., Obst, M., Beckingham, B., Karapanagioti, H. K. y Werner, D. (2015). Magnetite impregnation effects on the sorbent properties of activated carbons and biochars. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.12.016>
- Haque, E., Jun, J. W. y Jhung, S. H. (2011). Adsorptive removal of methyl orange and methylene blue from aqueous solution with a metal-organic framework material, iron terephthalate (MOF-235). *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 507-511. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.09.035>
- HASPULAT TAYMAZ, B., KAMIŞ, H. y YOLDAŞ, Ö. (2021). Photocatalytic degradation of malachite green dye using zero valent iron doped polypyrrole. *Environmental Engineering Research*, 27(2), 200,638. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.638>
- Jia, Y., Feng, L., Tian, H., Guo, J. y He, J. (2021). Exceedingly Rapid Enrichment of Organochlorine Pollutants in Complex Samples Using Amino-Functionalized Carbon Nanotubes. *ACS ES&T Water*, 1(4), 919-927. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.0c00236>
- Jung, K. W., Lee, S. y Lee, Y. J. (2017). Synthesis of novel magnesium ferrite (MgFe₂O₄)/ biochar magnetic composites and its adsorption behavior for phosphate in aqueous solutions. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.035>
- Kannan, K., Radhika, D., Sadasivuni, K. K., Reddy, K. R. y Raghu, A. V. (2020). Nanostructured metal oxides and its hybrids for photocatalytic and biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 281, 102,178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102178>

- Karthikeyan, C., Arunachalam, P., Ramachandran, K., Al-Mayouf, A. M. y Karuppuchamy, S. (2020). Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154281>
- Kutuzova, A., Dontsova, T. y Kwapinski, W. (2021). *Catalysts Application of TiO₂-Based Photocatalysts to Antibiotics Degradation: Cases of Sulfamethoxazole, Trimethoprim and Ciprofloxacin*. <https://doi.org/10.3390/catal11060728>
- Lan, J., Wang, Y., Huang, B., Xiao, Z. y Wu, P. (2021). *Application of polyoxometalates in photocatalytic degradation of organic pollutants*. <https://doi.org/10.1039/d1na00408e>
- Lehutso, R. F., Tancu, Y., Maity, A. y Thwala, M. (2020). Aquatic toxicity of transformed and product-released engineered nanomaterials: An overview of the current state of knowledge. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 39-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.002>
- Li, H., Mahyoub, S. A. A., Liao, W., Xia, S., Zhao, H., Guo, M. y Ma, P. (2017). Effect of pyrolysis temperature on characteristics and aromatic contaminants adsorption behavior of magnetic biochar derived from pyrolysis oil distillation residue. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.033>
- Li, X., Wang, C., Zhang, J., Liu, J., Liu, B. y Chen, G. (2020). Preparation and application of magnetic biochar in water treatment: A critical review. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134847>
- Li, Y., Zhao, H. y Yang, M. (2017). TiO₂ nanoparticles supported on PMMA nanofibers for photocatalytic degradation of methyl orange. *Journal of Colloid and Interface Science*, 508, 500-507. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.08.076>

- Liu, H., Wei, Y., Luo, J., Li, T., Wang, D., Luo, S. y Crittenden, J. C. (2019). 3D hierarchical porous-structured biochar aerogel for rapid and efficient phenicol antibiotics removal from water. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.03.007>
- Liu, T., Li, Y., Du, Q., Sun, J., Jiao, Y., Yang, G., Wang, Z., Xia, Y., Zhang, W., Wang, K., Zhu, H. y Wu, D. (2012). Adsorption of methylene blue from aqueous solution by graphene. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 90(1), 197-203. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2011.10.019>
- Liu, Y., Sohi, S. P., Liu, S., Guan, J., Zhou, J. y Chen, J. (2019). Adsorption and reductive degradation of Cr(VI) and TCE by a simply synthesized zero valent iron magnetic biochar. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.045>
- López-Tinoco, J., Lara-Romero, J., Rangel, R., Apolinar-Cortés, J., Paraguay-Delgado, F., Jiménez-Sandoval, S., Bazán-Díaz, L. y Mendoza-Cruz, R. (2021). Microwave-assisted synthesis of ceria nanoparticles on carbon nanotubes and their dye-removal assesment. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 70-82. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.04.036>
- López Zavala, M. Á., Lozano Morales, S. A. y Ávila-Santos, M. (2017). Synthesis of stable TiO₂ nanotubes: effect of hydrothermal treatment, acid washing and annealing temperature. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00456>
- Lu, L., Yu, W., Wang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Zhang, Y., Wu, Y., Ullah, H., Xiao, X. y Chen, B. (2020). Application of biochar-based materials in environmental remediation: from multi-level structures to specific devices. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00041-7>
- Marandi, G. B., Baharloui, M., Kurdtabar, M., Sharabian, L. M. y Mojarrad, M. A. (2015). Hydrogel with high laponite content as nanoclay: swelling and cationic dye adsorption properties. *Research on Chemical*

- Intermediates*, 41(10), 7,043-7,058. <https://doi.org/10.1007/s11164-014-1797-0>
- Menon, S., Agarwal, H. y Shanmugam, V. K. (2021). Catalytical degradation of industrial dyes using biosynthesized selenium nanoparticles and evaluating its antimicrobial activities. *Sustainable Environment Research*, 31(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00072-6>
- Moosavi, S., Yi Man Li, R., Wei Lai, C., Yusof, Y., Gan, S., Akbarzadeh, O., Zaman Chowhury, Z., Yue, X.-G. y RafieBin Johan, M. (s.f.). *Methylene Blue Dye Photocatalytic Degradation over Synthesised Fe₃O₄/AC/TiO₂ Nano-Catalyst: Degradation and Reusability Studies*. <https://doi.org/10.3390/nano10122360>
- Moreira, A. J., Campos, L. O., Maldí, C. P., Dias, J. A., Paris, E. C., Giraldi, T. R. y Freschi, G. P. G. (2020). Photocatalytic degradation of Prozac® mediated by TiO₂ nanoparticles obtained via three synthesis methods: sonochemical, microwave hydrothermal, and polymeric precursor. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), 27,032-27,047. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08798-x>
- Moreno, A., Figueroa, D. y Hormaza, A. (2012). Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Producción + Limpia*, 7(1), 9-18.
- Noraini, M. N., Abdullah, E. C., Othman, R. y Mubarak, N. M. (2016). Single-route synthesis of magnetic biochar from sugarcane bagasse by microwave-assisted pyrolysis. *Materials Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.064>
- Padhi, D. K., Parida, K. M. y Singh, S. K. (2016). Mechanistic aspects of enhanced congo red adsorption over graphene oxide in presence of methylene blue. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(3), 3,498-3,511. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2016.07.011>
- Qu, X., Alvarez, P. J. J. y Li, Q. (2013). Applications of nanotechnology in water and wastewater treatment. *Water Research*. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.058>

- Radoor, S., Karayil, J., Parameswaranpillai, J. y Siengchin, S. (2020). Adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by a novel PVA/CMC/halloysite nanoclay bio composite: Characterization, kinetics, isotherm and antibacterial properties. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 1,311-1,327. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00549-x>
- Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C. W., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N. S. y Ok, Y. S. (2016). Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: Potential and implication of biochar modification. *In Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.043>
- Ray, A. K. (2021). Recent Advances in the Photocatalytic Degradation of Direct Blue Dyes: A Critical Minireview and Analysis Study. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 33(3), 25,872-25,876. <https://doi.org/10.26717/bjstr.2021.33.005411>
- Sarkar, N., Sahoo, G. y Swain, S. K. (2020). Nanoclay sandwiched reduced graphene oxide filled macroporous polyacrylamide-agar hybrid hydrogel as an adsorbent for dye decontamination. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 23, 100,507. <https://doi.org/10.1016/J.NANOSO.2020.100507>
- Saxena, M., Sharma, N. y Saxena, R. (2020). Highly efficient and rapid removal of a toxic dye: Adsorption kinetics, isotherm, and mechanism studies on functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Surfaces and Interfaces*, 21, 100,639. <https://doi.org/10.1016/J.SURFIN.2020.100639>
- Shan, R., Lu, L., Gu, J., Zhang, Y., Yuan, H., Chen, Y. y Luo, B. (2020). Photocatalytic degradation of methyl orange by Ag/TiO₂/biochar composite catalysts in aqueous solutions. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 114, 105,088. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105088>

- Sonawane, S., Chaudhari, P., Ghodke, S., Phadtare, S. y Meshram, S. (2009). Ultrasound assisted adsorption of basic dye onto organically modified bentonitenanoclay. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68(2), 162-167.
- Song, G., Li, A., Shi, Y., Li, W., Wang, H., Wang, C., Li, R. y Ding, G. (s.f.). *Sorptive removal of methylene blue from water by magnetic multi-walled carbon nanotube composites*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13543-z>/Published
- Thamer, B. M., El-Hamshary, H., Al-Deyab, S. S. y El-Newehy, M. H. (2019). Functionalized electrospun carbon nanofibers for removal of cationic dye. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(6), 747-759. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2018.07.020>
- Vasiljevic, Z. Z., Dojcinovic, M. P., Vujanecvic, J. D., Jankovic-Castvan, I., Ognjanovic, M., Tadic, N. B., Stojadinovic, S., Brankovic, G. O. y Nikolic, M. V. (2020). *Photocatalytic degradation of methylene blue under natural sunlight using iron titanate nanoparticles prepared by a modified sol-gel method*. <https://doi.org/10.1098/rsos.200708>
- Wang, P., Cao, M., Wang, C., Ao, Y., Hou, J. y Qian, J. (2014). Kinetics and thermodynamics of adsorption of methylene blue by a magnetic graphene-carbon nanotube composite. *Applied Surface Science*, 290, 116-124. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2013.11.010>
- Wang, Shengsen, Gao, B., Li, Y., Creamer, A. E. y He, F. (2017). Adsorptive removal of arsenate from aqueous solutions by biochar supported zero-valent iron nanocomposite: Batch and continuous flow tests. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.01.052>
- Wang, Shengsen, Gao, B., Li, Y., Wan, Y. y Creamer, A. E. (2015). Sorption of arsenate onto magnetic iron-manganese (Fe-Mn) biochar composites. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/c5ra12137j>
- Wang, Shujuan, Guo, W., Gao, F., Wang, Y. y Gao, Y. (2018). Lead and uranium sorptive removal from aqueous solution

- using magnetic and nonmagnetic fast pyrolysis rice husk biochars. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/c7ra13540h>
- Wang, X., Hong, J., Huang, A., Zhong, S. y Tian, Y. (2014). Facile synthesis of mesoporous carbon microspheres with FePt nanoparticles via an in-situ one pot method. *Materials Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.096>
- wassel, A. R., El-Naggar, M. E. y Shoueir, K. (2020). Recent advances in polymer/metal/metal oxide hybrid nanostructures for catalytic applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104,175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104175>
- Wu, J., Huang, D., Liu, X., Meng, J., Tang, C. y Xu, J. (2018). Remediation of As(III) and Cd(II) co-contamination and its mechanism in aqueous systems by a novel calcium-based magnetic biochar. *Journal of Hazardous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.01.011>
- Wu, N., Hu, Q., Wei, R., Mai, X., Naik, N., Pan, D., Guo, Z. y Shi, Z. (2021). Review on the electromagnetic interference shielding properties of carbon based materials and their novel composites: Recent progress, challenges and prospects. *Carbon*, 176, 88-105. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2021.01.124>
- Yang, L., Gao, J., Liu, Y., Zhang, Z., Zou, M., Liao, Q. y Shang, J. (2018). Removal of Methyl Orange from Water Using Sulfur-Modified nZVI Supported on Biochar Composite. *Water, Air, and Soil Pollution*. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3992-x>
- Yap, M. W., Mubarak, N. M., Sahu, J. N. y Abdullah, E. C. (2017). Microwave induced synthesis of magnetic biochar from agricultural biomass for removal of lead and cadmium from wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.09.036>
- Yi, Y., Huang, Z., Lu, B., Xian, J., Tsang, E. P., Cheng, W., Fang, J. y Fang, Z. (2019). Magnetic biochar for environmental

- remediation: A review. *Bioresource Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122468>
- Zhang, H., Xue, G., Chen, H. y Li, X. (2018). Magnetic biochar catalyst derived from biological sludge and ferric sludge using hydrothermal carbonization: Preparation, characterization and its circulation in Fenton process for dyeing wastewater treatment. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.026>
- Zhong, D., Zhang, Y., Wang, L., Chen, J., Jiang, Y., Tsang, D. C. W., Zhao, Z., Ren, S., Liu, Z. y Crittenden, J. C. (2018). Mechanistic insights into adsorption and reduction of hexavalent chromium from water using magnetic biochar composite: Key roles of Fe₃O₄ and persistent free radicals. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.093>
- Zhu, S., Ho, S. H., Huang, X., Wang, D., Yang, F., Wang, L., Wang, C., Cao, X. y Ma, F. (2017). Magnetic Nanoscale Zerovalent Iron Assisted Biochar: Interfacial Chemical Behaviors and Heavy Metals Remediation Performance. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b00542>



8.2. TECNOLOGÍAS ELECTROQUÍMICAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA

Yolanda Reyes Vidal⁹
Fernando Felipe Rivera Iturbe¹⁰

Introducción

Tecnologías electroquímicas

A continuación, se presenta una reseña de los procesos electroquímicos para la remoción de contaminantes específicos desde su origen, que podrían ser planteados en la remediación ambiental del río Atoyac, como son contaminantes emergentes farmacéuticos (como naproxeno y amoxicilina), compuestos orgánicos agroindustriales, tintas azoicas y iones metálicos. Se revisarán los fundamentos de las tecnologías electroquímicas disponibles, como son procesos electroquímicos de oxidación avanzada, electrocoagulación y procesos bioelectroquímicos. Además, se enumeran aspectos importantes en el estado del arte y la utilización de cada tecnología electroquímica para la remoción de los contaminantes antes mencionados.

Procesos avanzados de oxidación electroquímica

Los procesos avanzados de oxidación (PAO) implican la generación de radicales altamente reactivos, como el radical

⁹ Investigadora por México CONACyT-CIDETEQ. Querétaro, correo-e: mreyes@cideteq.mx

¹⁰ Investigador por México CONACyT-CIDETEQ. Querétaro, correo-e: frivera@cideteq.mx

hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) (Figura 1). El radical hidroxilo es el oxidante más potente usado en el tratamiento de aguas residuales, puesto que tiene un potencial de oxidación E° de 2.80 V vs NHE (electrodo normal de hidrógeno, por sus siglas en inglés), sin embargo, otros oxidantes fuertes generados electroquímicamente pueden ser utilizados como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el cloro activo (HOCl) que tienen un potencial de oxidación de 1.78 y 1.49 V vs NHE, respectivamente. Cabe señalar que, debido a esta gama de componentes oxidantes, es posible diseñar un proceso de remediación ambiental a la medida del usuario, para poder llevar a cabo la degradación de una gran gama de componentes orgánicos recalcitrantes (García-Segura et al., 2018; Martínez-Huitile y Panizza, 2018), así como la desinfección (Robles et al., 2020) de estos efluentes pertenecientes a cuencas hídricas, para lograr su correcto aprovechamiento.

A continuación, se revisan cada una de las tecnologías electroquímicas que pueden ser utilizadas, para la remediación de efluentes contaminados como son los del río Atoyac. En esta sección, el análisis se enfoca en la remoción de contaminantes de diversa índole industrial. A pesar de ser procesos promisorios, estos no han sido escalados a un nivel industrial, debido a problemáticas que también se mencionan en cada una de las secciones y que son objetos de las investigaciones más recientes en el tema. La Tabla 1 resume las tecnologías utilizadas en la remoción de contaminantes nocivos de cuerpos de aguas naturales y efluentes de procesos industriales.

Tabla 1. Tecnologías electroquímicas utilizadas en la remoción de contaminantes nocivos de cuerpos de aguas naturales y efluentes de procesos industriales

Tipo de tratamiento	Contaminantes tratados	Densidad de corriente	Remoción DQO (%)	Referencias destacadas
Oxidación directa	Tintas azoicas, efluentes de curtiduría, contaminantes farmacéuticos.	10-600 A m ⁻²	55-95	[García-Segura et al., 2018]; [Palma-Goyes et al., 2010]; [Dominguez et al., 2012].
Electro-Fenton	Herbicidas, tintas de la industria textil, contaminantes emergentes	500-1000 A m ⁻²	56-9	[Lizama-Bahena et al., 2015]; [Thiam et al., 2015]; [Coria et al., 2016]; [Pérez et al., 2017]; [Steter et al., 2016]
Oxidación mediada	Fenoles, tintas de la industria textil, compuestos de tipo farmacéutico (antibióticos), desinfección	30-200 A m ⁻²	70-9	[Fajardo et al., 2017]; [Palma-Goyes et al., 2018b]; [He et al., 2016]; [Bonola et al., 2020].
Electro-coagulación	Metales, metaloides algunos tipos de materia orgánica.	3-200 A m ⁻²	ND	[Liu et al., 2021]; [García-Segura et al., 2017]; [Zhou et al., 2020]; [Zodi et al., 2009].
Sistemas Bioelectroquímicos	Contaminantes farmacéuticos	4.35–113 W m ⁻³	ND	[Xu et al., 2013]; [Wen et al., 2011]

Oxidación electroquímica

Generación anódica directa de •OH (EO)

Los procesos electroquímicos se basan en la utilización de reacciones que involucran transferencia de carga, promovidas por el uso de energía eléctrica ya sea para generar especies oxidantes en la superficie de los electrodos, o generar algún reactivo *in situ*. Para el primer caso, se obtienen especies oxidantes a partir de la imposición directa de energía, por lo que se generan especies oxidantes como el •OH (Coutiño et al., 2019). Para lograr la producción de estas especies con el uso de energía eléctrica, es necesario el uso de materiales electrocatalíticos como PbO₂

(Aquino et al., 2011), Electroodos de diamante dopados con Boro (BDD) (Aquino et al., 2011; Tsantaki et al., 2012), TiO_2 dopado con catalizadores derivados de la familia del Iridio y Rutenio (conocidos como DSA) (Basha et al., 2012), entre otros. Estos materiales se clasifican en activos y no activos al $\bullet\text{OH}$, donde es preferente el uso de los electroodos no activos, para obtener mayor rendimiento de remoción, dado que el $\bullet\text{OH}$ queda fisisorbido a la superficie del electrodo, a diferencia de los electroodos activos donde una quimisorción puede tomar lugar (García-Segura et al., 2018). El mecanismo por el cual se generan este tipo de radicales en cada uno de los tipos de electroodos fue propuesto en (Cominellis, 1994) y se encuentra explicado detalladamente en (García-Segura et al., 2018).

Debido a la alta reactividad de los oxidantes $\bullet\text{OH}$, este es el método electroquímico más utilizado para el tratamiento de contaminantes orgánicos altamente recalcitrantes como son la remoción de tintas de la industria textil con valores típicos de entre 250 y 1400 mg L^{-1} (García-Segura et al., 2018), y donde se presentan una gran variedad de tintas azoicas como, Azul 113 (Moura et al., 2016), Cristal Violeta (Palma-Goyes et al., 2010) y mezclas de diferentes compuestos (Tsantaki et al., 2012). El uso de electrocatalizadores, la corriente aplicada (desde 10 hasta 600 A m^{-2}) y el porcentaje de remoción reportados en este tipo de efluentes (desde 55 hasta 95%) es muy variado, requiriendo consumos de energía mayores a 5 kWh m^{-3} de efluente.

Por otro lado, el uso de esta tecnología ha sido reportado también para llevar a cabo la remoción de DQO de efluentes complejos provenientes de diversos ramos industriales que generalmente contienen altas cargas de contaminantes inorgánicos y orgánicos. Entre estos se puede destacar el tratamiento de efluentes de la industria de curtiduría de pieles (Panizza y Cerisola, 2005), alimentaria (Valero et al., 2014), química (Gargouri et al., 2014) y farmacéutica (Domínguez et al., 2012), utilizando principalmente electroodos de BDD. En cuanto a la remoción de sustancias emergentes, provenientes de efluentes domésticos e industrias farmacéuticas (Ghime y Gosh, 2019), existen diversos reportes del uso de este método para la remoción de antiinflamatorios y antibióticos en medio

acuosos como aspirina (Dai et al., 2016), amoxicilina (León et al., 2021), Tetraciclina (Zhi et al., 2017) entre otros compuestos. Igualmente, en estos casos los rendimientos de remoción varían del 50 al 95 %.

Cabe señalar que el rendimiento obtenido y el consumo de energía requerido en este tipo de aplicaciones dependerán de diversos factores, principalmente la concentración de los componentes a tratar y su DQO, el mecanismo de degradación, la velocidad cinética de cada uno de las reacciones involucradas (Ghime y Gosh, 2019), el tipo de electrodos (Martínez-Huitle y Panizza, 2018), condiciones de operación (García-Segura *et al.*, 2018) entre otros. Adicionalmente, para la aplicación de este tipo de tecnologías existen aún varias desventajas y retos de investigación; entre las más importantes se destacan como son el aumento del costo-beneficio de este tipo de tecnologías mediante la fabricación de electrocatalizadores más económicos, el aprovechamiento de las reacciones que ocurren en el cátodo de la celda (Lacasa et al., 2019) y el aumento del tiempo de contacto de las especies contaminantes hacia los radicales fisisorbidos en la superficie del electrodo, mediante análisis de aspectos de ingeniería de las celdas utilizadas (Lacasa et al., 2019; Cornejo et al., 2020).

Generación catódica indirecta, electro-Fenton (EF) y electro foto-Fenton (PEF)

A diferencia de la oxidación directa, donde el proceso de generación de $\bullet\text{OH}$ se lleva a cabo en el ánodo y que su característica principal es que este oxidante se encuentra fisisorbido en la superficie del mismo, es posible estabilizar dicho radical en solución mediante la generación indirecta, utilizando el reactivo de Fenton (EF). Este mecanismo consiste en generar la especie oxidante fuerte, mediante la producción electroquímica de H_2O_2 en el cátodo de una celda electroquímica, que a su vez reaccionará de manera homogénea con iones de Fe^{2+} en baja concentración, para producir el radical $\bullet\text{OH}$, mediante oxidación química (Peralta et al., 2005; Cheng-Chu y Jia-Fa, 2007).

El proceso puede ser potenciado si se utiliza radiación UV (longitudes de onda entre 160 y 780 nm) artificial o solar, por lo que la velocidad de degradación de contaminantes orgánicos con este sistema resulta notablemente acelerada, siendo este un proceso foto-electro Fenton (PEF, por sus siglas en inglés). En estas condiciones, la fotólisis de complejos Fe^{3+} , permite la regeneración de la forma reducida del promotor favoreciendo el ciclo catalítico. El radical hidroxilo es producido principalmente de dos formas durante el proceso foto electro-Fenton: a) fotólisis del peróxido, y b) reacción redox entre Fe^{2+} y H_2O_2 (Peralta et al., 2005; como se citaron en Robles et al., 2020).

Dada la simplicidad del proceso debido a que el uso de costosos electrocatalizadores en el cátodo no es necesario, se han llevado a cabo un gran número de reportes donde se utiliza esta tecnología para la remoción de una gran diversidad de contaminantes como son efluentes contaminados con herbicidas basados en cloro (considerados unos de los contaminantes agroquímicos más tóxicos) (Lizama-Bahena et al., 2015), efluentes de la industria textil (Thiam et al., 2015), compuestos emergentes como naproxeno, eritromicina y metilparabeno (Coria et al., 2016; Pérez et al., 2017; Steter et al., 2016), entre otras. La carga orgánica de estos efluentes fue desde 40 hasta aprox. 1300 mg L^{-1} de DQO, y los porcentajes reportados con porcentajes de degradación que van desde el 56 % hasta el 96 % para DQO y carbono orgánico total (COT).

Debido a que una de las características de este proceso, consiste en aumentar la disposición del H_2O_2 , para generar los radicales $\bullet\text{OH}$, es necesaria la utilización de electrodos carbonáceos tridimensionales, el cual resulta un buen material de electrodo para la generación del peróxido. Es por ello que la corriente total y los consumos de energía para este tipo de tecnologías puede resultar alto. Particularmente, se han reportado el uso de densidades de corriente desde 500 hasta 1000 A m^{-2} , aunque el uso de mayores densidades de corriente, no garantizan una alta remoción de DQO, debido a la facilidad de favorecer reacciones secundarias en este tipo de electrodos (como es la generación de hidrogeno del medio). Sin embargo, este proceso es muy atractivo para su aplicación, desde que los rendimientos

de remoción son mayores, que mediante el uso de EO (García-Espinoza et al., 2021).

Generación directa de cloro activo

Este proceso se conoce también, como oxidación electroquímica indirecta, ya que como en los procesos EF y PEF, la remoción de los contaminantes orgánicos se lleva a cabo generalmente en la fase homogénea. El mecanismo de formación típico consiste en llevar a cabo la oxidación del ión Cl^- para formar cloro gas (Cl_2) que enseguida se hidroliza en el medio acuoso para formar las especies de cloro activo solubles (principalmente HOCl) (García-Segura et al., 2018), aunque en ciertos materiales no activos, el Cl^- puede reaccionar con el radical $\bullet\text{OH}$ fisisorbido para generar especies absorbidas en la superficie del electrodo del tipo $\text{M}(\text{HOCl})_{\text{ads}}$ (Rosistolato et al., 2014). Al igual que en la EO, el uso de electrocatalizadores es necesario, sin embargo, estos deben de ser selectivos a la oxidación directa del ión Cl^- como los electrodos activos basados en RuO_2 , Pt, TiO_2 dopados con metales de transición, entre otros (García-Segura et al., 2018), aunque como se mencionó anteriormente, se ha reportado también el uso de ánodos no activos basados en óxidos de zirconio, para favorecer la adsorción de las especies tipo $\text{M}(\text{HOCl})_{\text{ads}}$ (Palma-Goyes et al., 2018a).

En ese sentido, este proceso de oxidación mediada consiste en aprovechar la presencia de cloruros (Cl^-) que se encuentran en diversos efluentes industriales como en los de la industria textil, alimentaria, de síntesis química y farmacéutica (Moura et al., 2015). Existen también una gran diversidad de reportes de la aplicación de la cloración directa a la remoción de contaminantes emergentes de tipo terapéutico, así como de tintas azoicas. Entre los que se puede destacar, es la remoción de fenoles (Fajardo et al., 2017), colorante negro reactivo 5 (Jager et al., 2018), rodaminas (Baddouh et al., 2018), índigo carmín (Palma-Goyes et al., 2018b), tintas de trifenilmetano (He et al., 2016), enrofloxacin (Carneiro et al., 2018), creatinina (Singla et al., 2018) y sulfametoxazol (Bonola et al., 2020). Los porcentajes de remoción usando esta técnica también son muy

promisorios, ya que la eliminación de DQO se lleva hasta el 98%, teniendo la ventaja de que, bajo ciertas circunstancias, la velocidad de remoción incrementa de manera exponencial con la concentración de iones Cl^- (Zou et al., 2017).

Los valores de la eficiencia y el consumo de energía obtenidos son diversos para cada reporte, por lo que uno de los mayores retos de la generación electroquímica de cloro activo es justamente la de entender el papel que juega el tipo y geometría de electrodo (Cheng y Kelsall et al., 2007) y las condiciones de electrolisis en el rendimiento del proceso. También una de las cuestiones más controversiales del uso de esta tecnología para la remoción de contaminantes orgánicos es de la posible generación de compuestos organoclorados (ya que para que esto suceda, se requiere que la estructura de la molécula a abatir tenga átomos de Cl de acuerdo con (Serna-Galvis et al., 2017) que tendrían un impacto negativo en el medio ambiente, por lo que es necesario llevar a cabo investigación en materiales de ánodo novedosos que permitan la generación de otros oxidantes fuertes basados en oxígeno para disminuir la probabilidad de generar este tipo de componentes.

Finalmente, como se ha mencionado, la velocidad de remoción depende del contacto entre el cloro activo en fase acuosa y el contaminante, por lo que otro tema de desarrollo de esta tecnología consiste en el estudio de los aspectos de ingeniería que tienen que ver con el mezclado de la fase homogénea en los diversos reactores utilizados, ya que se ha reportado que factores como la velocidad de flujo a la entrada de los reactores, pueden disminuir el rendimiento del proceso, por el fenómeno de reducción de especies de cloro activo en el cátodo y al incremento del pH del medio debido a la reacción secundaria de evolución de oxígeno (Palma-Goyes et al., 2019). También es importante mencionar que se han propuesto tecnologías para generar oxidantes más fuertes como radicales $\bullet\text{OH}$ mediante la homólisis de HOCl , utilizando materiales foto-catalíticos e incidencia de radiación UV para el tratamiento de contaminantes agroquímicos (Coledam et al., 2018).

Electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación (EC) se basa en el principio de coagulación química donde iones de carga positiva como Fe^{3+} y Al^{3+} generan un exceso de carga superficial y una menor repulsión electrostática para formar partículas de mayor tamaño que suelen sedimentar de manera rápida, removiendo de esa manera contaminantes de tipo coloidal y en forma acuosa. Estas tecnologías se basan en la dosificación de aluminio o hierro mediante electrodos o ánodos de sacrificio. Es decir, el proceso se basa en la disolución de electrodos de hierro o aluminio aplicando una determinada diferencia de potencial o densidad de corriente, con el objetivo de generar cationes de aluminio o hierro que se disuelven e interactúan con las partículas suspendidas. Este mecanismo se encuentra descrito de manera detallada en (Hakizimana et al., 2017).

La electrocoagulación permite una dosificación paulatina del coagulante a diferencia de la coagulación tradicional donde la adición de este se realiza en una sola dosificación, además de que el hidrógeno generado en el cátodo de este tipo de celdas puede ayudar a hacer más eficientes los procesos de floculación y por consiguiente el de precipitación. Dada la gran versatilidad de los iones Fe^{3+} y Al^{3+} para formar flóculos con muchos contaminantes de tipo coloidal, es posible usar este proceso para la remoción de Caolín (Hari y Adin, 2011), microalgas nocivas (Landels et al., 2019), y en general sólidos disueltos, así como la remoción de grasas y aceites de la industria alimenticia y petrolera, mediante el proceso de emulsificación (Liu et al., 2021).

En cuanto a la remoción de contaminantes acuosos, se ha estudiado de manera amplia la remoción de los metaloides F^{-1} y As^{+3} de aguas superficiales pertenecientes a cuencas hidrológicas con esta técnica (García-Segura et al., 2017), la remoción de Cr^{6+} en efluentes de desecho industrial (Zhou et al., 2020), así como en efluentes de la industria textil (Zodi et al., 2009), donde se aprovecha el cambio de pH en el cátodo para cambiar la constante de solubilidad de estas sustancias o la capacidad de adsorción de los flóculos y electrodos que permiten la remoción de este tipo de componentes (Hakizimana et al., 2017; Liu et al., 2021).

Para que esta tecnología sea aplicable de manera exitosa en problemas ambientales, es necesario establecer las características que deben tener los floculantes, como su diámetro, tamaño, estabilidad mecánica y geometría fractal, así como entender la influencia de los parámetros de operación en dichas características, como son la densidad de corriente, el pH inicial de la solución, la intensidad de agitación, temperatura de la celda entre otras (Hakizimana et al., 2017; Liu et al., 2021). Los rangos típicos de aplicación de corriente eléctrica en esta tecnología van desde 3.4 hasta 200 A m⁻² utilizando pares de electrodos Fe-Fe, Al-Al o una combinación de ambos, generalmente dispuestos en una configuración de placas paralelas en tanques rectangulares agitados.

Cabe señalar que una vez más una de las desventajas y áreas de oportunidad de investigación en estas tecnologías, radican en la cantidad de energía requerida para llevar a cabo el proceso y la búsqueda de alternativas para la disminución de la misma. Algunos autores han reportado el aprovechamiento de las reacciones catódicas para implementar sistemas combinados como EC-EF (An et al., 2019), EC-celda galvánica metal-aire (Xu et al., 2020) y la aplicación de corriente alterna durante el proceso de floculación (Mao et al., 2008). También, factores como el diseño, la geometría y disposición de los pares de electrodos y la conductividad eléctrica del efluente se deben tomar en cuenta (Hakizimana et al., 2017) para el aumento del rendimiento y la disminución del consumo de energía.

Uso de tecnologías electroquímicas microbianas (TEM) para la degradación de productos farmacéuticos

Las configuraciones tradicionales de las TEM, como celdas de combustible microbianas (CCM) y celdas de electrólisis microbianas (CEM), han sido utilizadas para la degradación de algunos antibióticos y medicamentos presentes en aguas residuales, con recuperación de energía (Wang et al., 2017; Zhou et al., 2018). Así, en CCM se generaron 120 mW m⁻², removiendo 94% de triclosán, con TRH = 2 días (Xu et al., 2020). Otros compuestos, como la cefazolina, son degradados

en CCM con tasas de remoción mayores al 70%, en tiempos de retención hidráulica (TRH) bajos (1.5 días) (Zhang et al., 2018). En algunas aplicaciones, para el funcionamiento exitoso de las TEM se requiere del uso de cosustratos, que permitan el co-metabolismo de los microorganismos (obtención de energía por la fuente de carbono y funcionamiento de la actividad enzimática) ante la presencia tóxica de altas concentraciones de compuestos como los antibióticos.

Por ejemplo, en (Wen et al., 2011) añadieron 1 g L^{-1} de glucosa a una CCM para obtener altos porcentajes de remoción de ceftriaxona (91%), y además generar altos valores de energía (113 W m^{-3}). Mientras que en (Zhang et al., 2017) degradaron cloranfenicol (96%) añadiendo acetato como donador de electrones. Así, las TEM presentan altas eficiencias de remoción de antibióticos por las capacidades genéticas de los microorganismos electrogénicos de las biopelículas de los electrodos, como es la baja expresión de los genes de resistencia a antibióticos, por ejemplo, en la remoción de norfloxacina (Ondon et al., 2020).

En años recientes, se han desarrollado numerosos estudios que evalúan la degradación de antibióticos, mediante el acoplamiento de las TEM a sistemas de tratamiento de efluentes como los humedales construidos. En su configuración de CCM-Humedal Construido, usando *Canna indica* como planta establecida, se lograron remover porcentajes mayores al 99% de sulfametoxazol y tetraciclina, en TRH de 1 día (Wen et al., 2020). Otra configuración acoplada, se tiene entre las TEM y los sistemas de oxidación avanzada como la oxidación de Fenton, llamados sistemas Bio-Electro-Fenton (BEF). En estos sistemas, se aprovecha la oxidación de la materia orgánica en la cámara anódica, para la generación de bio-electrones y protones (metabolismo celular) que evitan el suministro de una fuente externa de corriente, requerida para el proceso Fenton (Hassan et al., 2019).

Recientemente, se encontró que a altas concentraciones de sustrato ($2000 - 10000 \text{ mg L}^{-1}$) en la cámara anódica de un sistema BEF, permiten obtener altos valores de energía (Soltani et al., 2021). Sin embargo, a tales condiciones disminuye la

eficiencia de remoción de tetraciclina, pero que es posible encontrar concentraciones límite de sustrato (2000 mg L^{-1}) para alcanzar porcentajes de remoción casi total ($>99\%$) usando concentraciones iniciales de 5 mg L^{-1} de tetraciclina. Otros compuestos que se han degradado eficientemente en sistemas BEF son hormonas como 17α -etinil-estradiol y 17β -estradiol, con generación de energía de hasta 4.35 W m^{-3} (Xu *et al.*, 2013) y paracetamol (Zhang *et al.*, 2015).

Referencias bibliográficas

- An, J., Li N., Wang, S., Liao C., Zhou, L., Li T., Wang, X. y Feng, Y. (2019). A novel electrocoagulation- Fenton for energy efficient cyanobacteria and cyanotoxins removal without chemical addition. *J. Hazard. Mater.*, 365, 650-658.
- Aquino, J. M., Pereira, G. F., Rocha-Filho, R. C., Bocchi, N. y Biaggio, S. R. (2011). Electrochemical degradation of a real textileeffluent using boron-doped diamond or β -PbO₂ as anode. *J. Hazard. Mater.*, 192, 1,275-1,282.
- Baddouh, A., Bessegato, G.G., Rguiti, M.M., El Ibrahimy, B., Bazzi, L., Hilali, M. y Zaroni M.V.B. (2018). Electrochemical decolorization of rhodamine B dye: influence of anode material, chloride concentration and current density. *J. Environ. Chem. Eng.*, 6, 2,041-2,047.
- Basha, C. A., Sendhil, J., Selvakumar, K. V., Muniswaran, P. K. A. y Lee, C. W. (2012). Electrochemical degradation of textile dyeing industry effluent in batch and flow reactor systems. *Desalination*, 285, 188-197.
- Bonola, B., Aguilar, D., Fuentes-Camargo, I., Sosa-Rodríguez, F. S., Hernández-Altamirano, R., Luna-Sánchez, R. y Vazquez-Arenas, J. (2020). Implications to enhance sulfamethoxazole degradation using statistical optimization of either active chlorine concentration or ORP in an electrochemical reactor. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 104,179.

- Carneiro, J. F., Aquino, J. M., Silva, A. J., Barreiro, J. C., Cass, Q. B. y Rocha-Filho, R. C. (2018). The effect of the supporting electrolyte on the electrooxidation of enrofloxacin using a flow cell with a BDD anode: kinetics and follow-up of oxidation intermediates and antimicrobial activity. *Chemosphere*, 206, 674-681.
- Cheng, C. Y. y Kelsall, G. H. (2007). Models of Hypochlorite production in electrochemical reactors with plate and porous anodes. *J. Appl. Electrochem.*, 37, 1,203-1,217.
- Cheng-Chu, J. y Jia-Fa, Z. (2007). Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Zhejiang Univ. Sci. A.*, 8, 1,118-1,112.
- Coledam, D. A. C., Sánchez-Montes, I., Silva, B. F. y Aquino, J. M. (2018). On the performance of HOCl/Fe²⁺, HOCl/Fe²⁺/UVA, and HOCl/UVC processes using in situ electrogenerated active chlorine to mineralize the herbicide picloram. *Appl. Catal.*, 227, 170-179.
- Comminellis, C. (1994). Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochim. Acta*, 39, 1,857-1,862.
- Coria, G., Sirés, I., Brillas, E. y Nava, J. L. (2016). Influence of the anode material on the degradation of naproxen by Fenton-based electrochemical processes. *Chem. Eng. J.*, 304, 817-825.
- Cornejo, O. M., Murrieta, M. F., Castañeda, L. F. y Nava, J. L. (2020). Characterization of the reaction environment in flow reactors fitted with BDD electrodes for use in electrochemical advanced oxidation processes: A critical review. *Electrochim. Acta*, 331, 135,373.
- Coutiño-González, E., Espejel-Ayala, F., Rivera-Iturbe, F., Robles-Gutiérrez, I. y Reyes-Vidal, Y. (2019). Tecnologías electroquímicas para el tratamiento de efluentes, Capítulo 4.1. En Navarro-Frómata, A. E., Leyva-Inzunza, Z. C. y Mendoza-Hernández, J. C. *Tópicos sobre contaminantes y contaminación del agua*. D.R. © CLAVE Editorial.

- Dai, Q., Xia, Y. y Chen, J. (2016). Mechanism of enhanced electrochemical degradation of highly concentrated aspirin wastewater using a rare earth La-Y co-doped PbO₂ electrode. *Electrochim. Acta*, 188, 871-881.
- Domínguez, J. R., González, T., Palo P., Sánchez-Martín, J., Rodrigo, M. A. y Sáez, C. (2012). Electrochemical degradation of a real pharmaceutical effluent. *Water Air Soil Pollut.*, 233, 2,685-2,694.
- Fajardo, A. S., Seca, H. F., Martins, R. C., Corceiro, V. N., Freitas, I. F., Quinta-Ferreira, M. E. y Quinta-Ferreira, R. M. (2017). Electrochemical oxidation of phenolic wastewaters using a batch-stirred reactor with NaCl electrolyte and Ti/RuO₂ anodes. *J. Electroanal. Chem.*, 785, 180-189.
- García-Espinoza, J. D., Robles, I., Durán-Moreno, A. y Godínez, L. A. (2021). Photo-assisted electrochemical advanced oxidation processes for the disinfection of aqueous solutions: A review. *Chemosphere*, 274, 129,957.
- García-Segura, S., Eiband, M. M. S. G., Vieira de Melo, J. y Martínez-Huitle, C. A. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *J. Electroanal. Chem.*, 801, 267-299.
- García-Segura, S., Ocon, J. D. y Chong, M. N. (2018). Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents — A review. *Process Saf. Environ. Prot.*, 113, 48-67.
- Gargouri, B., Gargouri, O. D., Gargouri, B., Trabelsi, S. K., Abdelhedi, R. y Bouaziz, M. (2014). Application of electrochemical technology for removing petroleum hydrocarbons from produced water using lead dioxide and boron-doped diamond electrodes. *Chemosphere*, 117, 309-315.
- Ghime, D. y Ghosh, P. (2019). Removal of Organic Compounds Found in the Wastewater through Electrochemical Advanced Oxidation Processes: A Review. *Russ. J. Electrochem.*, 55(7), 591-620.

- Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. y Naja J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21.
- Harif, T. y Adin, A. (2011). Size and structure evolution of kaolin-Al(OH)₃ flocs in the electroflocculation process: A study using static light scattering. *Water Res.*, 45, 6,195-6,206.
- Hassan, M., Olvera-Vargas, H., Zhu, X., Zhang, B. y He, Y. (2019). Microbial electro-Fenton: An emerging and energy-efficient platform for environmental remediation. *J. Power Sources.*, 424, 220-244.
- He, Y., Wang, X., Huang, W., Chen, R., Lin, H. y Li, H. (2016). Application of porous boron-doped diamond electrode towards electrochemical mineralization of triphenylmethane dye. *J. Electroanal. Chem.*, 775, 292-298.
- Jager, D., Kupka, D., Vaclavikova, M., Ivanicova, L. y Gallios, G. (2018). Degradation of reactive black 5 by electrochemical oxidation. *Chemosphere*, 190, 405-416.
- Lacasa, E., Cotillas, S., Saez, C., Lobato, J., Cañizares, P. y Rodrigo, M. A. (2019). Environmental applications of electrochemical technology. What is needed to enable full-scale applications? *Curr. Opin. Electrochem.*, 16, 149-156.
- Landels, A., Beacham, T. A., Evans, C. T., Carnovale, G., Raikova, S., Cole, I. S., Goddard, P., Chuck, C. y Allen, M. J. (2019). Improving electrocoagulation floatation for harvesting microalgae. *Algal Res.*, 39, 101,446.
- León, I., Gomes, H., Sepúlveda-Guzmán, S., Cárdenas, J., Rivera, F., Manríquez, J. y Bustos, E. (2021). Electro-oxidation of amoxicillin using titanium electrodes electrophoretically coated by iridium or ruthenium with tantalum oxides. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 96(3), 622-629.
- Liu, Y., Zhang, X., Jiang, W., Wu, M. y Li, Z. (2021). Comprehensive review of floc growth and structure

- using electrocoagulation: Characterization, measurement, and influencing factors. *Chem. Eng. J.*, 417, 129,310.
- Lizama-Bahena, C., Álvarez-Gallegos, A., Hernandez, J.A. y Silva-Martínez, S. (2015). Elimination of bio-refractory chlorinated herbicides like atrazine, alachlor, and chlorbromuron from aqueous effluents by Fenton, electro-Fenton, and peroxi-coagulation methods. *Desalination Water Treat.*, 55, 3,683-3,693.
- Mao, X., Hong, S., Zhu, H., Lin, H., Wei, L. y Gan, F. (2008). Alternating pulse current in electrocoagulation for wastewater treatment to prevent the passivation of al electrode. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.*, 23, 239-241.
- Martínez-Huitle, C. A., dos Santos, E. V., de Araújo, D. M. y Panizza, M. (2012). Applicability of diamond electrode/anode to the electrochemical treatment of a real textile effluent. *J. Electroanal. Chem.*, 674, 103-107.
- Martínez-Huitle, C. A. y Panizza, M. (2018). Electrochemical oxidation of organic pollutants for wastewater treatment. *Curr. Opin. Electrochem.*, 11, 62-71.
- Moura, D. C., Brito, C. N., Quiroz, M. A., Pergher, S. B. C. y Martínez-Huitle, C. A. (2015). Cl-mediated electrochemical oxidation for treating an effluent using platinum and diamond anodes. *J. Water Process Eng.*, 8, e31-e36.
- Moura, D. C., Quiroz, M. A., Silva, D. R., Salazar, R. y Martínez-Huitle, C. A. (2016). Electrochemical degradation of Acid Blue 113 dye using TiO₂-nanotubes decorated with PbO₂ as anode. *Environ Nanotechnol Monit Manage*, 5, 13-20.
- Ondon, B. S., Li, S., Zhou, Q. y Li, F. (2020). Simultaneous removal and high tolerance of norfloxacin with electricity generation in microbial fuel cell and its antibiotic resistance genes quantification. *Bioresour. Technol.*, 304, 122,984.
- Palma-Goyes, R. E., Guzmán-Duque, F. L., Peñuela, G., González, I., Nava J. L. y Torres-Palma, R. A. (2010).

- Electrochemical degradation of crystal violet with BDD electrodes: Effect of electrochemical parameters and identification of organic by-products. *Chemosphere*, 81, 26-32.
- Palma-Goyes, R. E., Rivera, F. F. y Vazquez-Arenas, J. (2019). Heterogeneous Model To Distinguish the Activity of Electrogenerated Chlorine Species from Soluble Chlorine in an Electrochemical Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 58, 22,399-22,407.
- Palma-Goyes, R. E., Vazquez-Arenas, J., Ostos, C., Manzo-Robledo, A., Romero-Ibarra, I., Calderón, J. A. y González, I. (2018a). In search of the active chlorine species on Ti/ZrO₂-RuO₂-Sb₂O₃ anodes using DEMS and XPS. *Electrochim. Acta*, 275, 265-274.
- Palma-Goyes, R. E., Silva-Agredo, J., Vazquez-Arenas, J., Romero-Ibarra, I. y Torres-Palma, R. A. (2018b). The effect of different operational parameters on the electrooxidation of indigo carmine on Ti/IrO₂-SnO₂-Sb₂O₃. *J. Environ. Chem. Eng.*, 6, 3,010-3,017.
- Panizza, M. y Cerisola G. (2004). Electrochemical oxidation as a final treatment of synthetic tannery wastewater. *Environ. Sci. Technol.*, 38, 5,470-5,475.
- Peralta-Hernández, J. M., Mejía, S., Godínez, L. A. y Meas-Von, Y. (2005). Fenton and electrochemical approaches for water purification technologies. *Research Signpost*, 81, 101-130.
- Pérez, T., Sirés, I., Brillas, E. y Nava, J. L. (2017). Solar photoelectro-Fenton flow plant modeling for the degradation of the antibiotic erythromycin in sulfate medium. *Electrochim. Acta*, 228, 45-56.
- Robles, I., Becerra, E., Barrios, J. A., Maya, C., Jiménez, B., Rodríguez-Valadez, F. J., Rivera, F., García-Espinoza, J. D. y Godínez, L. A. (2020). Inactivation of helminth eggs in an electro-Fenton reactor: Towards full electrochemical disinfection of human waste using activated carbon. *Chemosphere*, 250, 126,260.
- Robles, I., Moreno-Rubio, G., García-Espinoza, J. D., Martínez-Sánchez, C., Rodríguez, A., Meas-Vong, Y., Rodríguez-

- Valadez, F. J. y Godínez, L. A. (2020). Study of polarized activated carbon filters as simultaneous adsorbent and 3D-type electrode materials for electro-Fenton reactors. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8, 104-114.
- Rosestolato, D., Fregoni, J., Ferro, S. y de Battisti, A. (2014). Influence of the nature of the electrode material and process variables on the kinetics of the chlorine evolution reaction. The case of IrO₂-based electrocatalysts. *Electrochim. Acta*, 139, 180-189.
- Serna-Galvis, E. A., Jojoa-Sierra, S. D., Berrio-Perlaza, K. E., Ferraro, F. y Torres-Palma, R. A. (2017). Structure-reactivity relationship in the degradation of three representative fluoroquinolone antibiotics in water by electrogenerated active chlorine. *Chem. Eng. J.*, 315, 52-561.
- Singla, J., Verma, A. y Sangal, V. K. (2018). Parametric optimization for the treatment of human urine metabolite, creatinine using electro-oxidation. *J. Electroanal. Chem.*, 809, 136-146.
- Soltani, F., Nahid, N., Khorsandi, H., Rahimnejadb, M. y Alizadeh, S. (2021). A novel bio-electro-Fenton system with dual application for the catalytic degradation of tetracycline antibiotic in wastewater and bioelectricity generation. *RSC Adv.*, 11, 27,160.
- Steter, J. R., Brillas, E. y Sirés, I. (2016). On the selection of the anode material for the electrochemical removal of methylparaben from different aqueous media. *Electrochim. Acta*, 222, 1,464-1,474.
- Thiam, A., Sirés, I. y Brillas, E. (2015). Treatment of a mixture of food color additives (E122, E124 and E129) in different water matrices by UVA and solar photoelectro-Fenton. *Water Res.*, 81, 178-187.
- Tsantaki, E., Velegraki, T., Katsaounis, A. y Mantzavinos, D. (2012). Anodic oxidation of textile dyehouse effluents on boron-doped diamond electrode. *J. Hazard. Mater.*, 207-208, 91-96.
- Valero, D., García-García, V., Expósito, E., Aldaz, A. y Montiel, V. (2014). Electrochemical treatment of wastewater

- from almond industry using DSA-type anodes: direct connection to a PV generator. *Sep. Purif. Technol.*, 123, 15-22.
- Wang, J., He, M. F., Zhang, D., Ren, Z., Song, T. y Xie, J. (2017). Simultaneous degradation of tetracycline by a microbial fuel cell and its toxicity evaluation by zebrafish. *RSC Adv.*, 7, 44,226.
- Wen, Q., Kong, F., Zheng, H., Yin, J., Cao, D., Ren, Y. y Wang, G. (2011). Simultaneous processes of electricity generation and ceftriaxone sodium degradation in an air-cathode single chamber microbial fuel cell. *J. Power Sources.*, 196, 2,567-2,572.
- Xu, W., Jin, B., Zhou, S., Su, Y. y Zhang ,Y. (2020). Triclosan removal in microbial fuel cell: The contribution of adsorption and bioelectricity generation. *Energies*, 13, 761.
- Xu, K., Lu, J., Tegladza, I. D., Xu, Q., Yang, Z. y Lu, G. (2020). Combined metal/air fuel cell and electrocoagulation process: Energy generation, flocs production and pollutant removal. *Chemosphere*, 255, 126,925.
- Xu, N., Zhang, Y., Tao, H., Zhou, S. y Zeng, Y. (2013). Bio-electro-Fenton system for enhanced estrogens degradation. *Bioresour. Technol.*, 138, 136-140.
- Zhang, E., Yu, Q., Zhai, W., Wang, F. y Scott, K. (2018). High tolerance of and removal of cefazolin sodium in single-chamber microbial fuel cells operation. *Bioresour. Technol.*, 249, 76-81.
- Zhang, Q., Zhang, Y. y Li, D. (2017). Cometabolic degradation of chloramphenicol via a meta-cleavage pathway in a microbial fuel cell and its microbial community. *Bioresour. Technol.*, 229, 104-110.
- Zhang, L., Yin, X. y Li, S. F. Y. (2015). Bio-electrochemical degradation of paracetamol in a microbial fuel cell-Fenton system. *Chem. Eng. J.*, 276, 185-192.
- Zhi, D., Qin, J., Zhou, H., Wang, J. y Yang, S. (2017). Removal of tetracycline by electrochemical oxidation using a Ti/SnO₂ -Sb anode: characterization, kinetics, and

- degradation pathway. *J. Appl. Electrochem.*, 47, 1,313-1,322.
- Zhou, R., Liu, F., Wei, N., Yang, C., Yang, J., Wu, Y., Li, Y., Xu, K., Chen, X. y Zhang, C. (2020). Comparison of Cr(VI) removal by direct and pulse current electrocoagulation: Implications for energy consumption optimization, sludge reduction and floc magnetism. *J. Water Process Eng.*, 37, 101,387.
- Zhou, Y., Zhu, N., Guo, W., Wang, Y., Huang, X., Wu, P., Dang, Z., Zhang, X. y Xian, J. (2018). Simultaneous electricity production and antibiotics removal by microbial fuel cells. *J. Environ. Manage.*, 217, 565-572.
- Zodi, S., Potier, O., Lapicque, F. y Leclerc, J. P. (2009). Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: Effect of operating parameters on the sludge settling characteristics. *Sep. Purif. Technol.*, 69, 29-36.
- Zou, J., Peng, X., Li, M., Xiong, Y., Wang, B., Dong, F. y Wang, B. (2017). Electrochemical oxidation of COD from real textile wastewaters: kinetic study and energy consumption. *Chemosphere*, 171, 332-338.

8.3. NANOCOMPUESTOS SOPORTADOS PARA REGENERACIÓN DE AGUA

S. Alejandro Lozano Morales¹¹

Introducción

El deterioro ambiental que se vive en nuestra sociedad actual en gran parte ha sido ocasionado por el llamado cambio climático. Con respecto a esto, uno de los sistemas más sofocados y que resulta de vital importancia para mantener el equilibrio ecológico-ambiental es lo concerniente al sistema hídrico global, el cual, ha sido devastado hasta alcanzar índices de contaminación preocupantes. Como respuesta a esta situación se han propuesto alternativas tecnológicas bastante prometedoras mediante la implementación de la nanotecnología desde la perspectiva del diseño, preparación y caracterización de nanomateriales combinados con sistemas híbridos en procesos de adsorción físico/química y óxido-reducción química, principalmente.

Sin embargo, existe el riesgo latente del uso inapropiado de nanomateriales; teniendo en cuenta que estos materiales, debido a sus propiedades de pequeña escala y alta superficie, pueden invadir el sistema de defensa natural del cuerpo humano u otras especies y paulatinamente afectar las funciones celulares (Lehutso et al., 2020). Además de esto, las nanopartículas liberadas pueden ingresar al medio ambiente y, finalmente, depositarse en las superficies terrestres y sistemas acuáticos; con esto, eventualmente también pueden llegar a ser catalogadas como posibles contaminantes.

¹¹ Investigador por México CONACyT-CIQA. Saltillo, Coahuila. México, correo-e: alejandro.lozano@ciqa.edu.mx

En consecuencia, uno de los grandes retos a vencer para poder hacer uso del potencial de los nanomateriales, en procesos que contribuyan a la regeneración del agua es crear medios, sistemas y/o arreglos que funcionen como soporte de nanopartículas; es decir, obtener matrices en las cuales se logren retener parcial o permanentemente a las nanoestructuras. En este sentido, una de las propuestas más convincentes es el uso de nanomateriales combinados con sistemas híbridos en procesos sinérgicos de adsorción físico-química y óxido-reducción química; esto es, la aplicación de nanopartículas cerámicas, metálicas, magnéticas, carbonosas, etcétera, con materiales empleados como soportes hechos a base de compuestos carbonosos (biochar) y/o fibras poliméricas, y/o arcillas modificadas, entre otros materiales de soporte, acoplados a sistemas de filtración de membranas.

Por ende, esta sección describe solo algunas de las tecnologías más prometedoras a nivel global para la regeneración de agua, mediante compuestos a base de materiales de soporte con nanopartículas de diversas composiciones químicas. Por lo tanto, las actividades que propongan este tipo de soluciones tecnológicas resultan alentadoras; que, si bien son complejas, esto no debería minimizar su aplicación potencial. En otras palabras, como decía Hipócrates “a grandes males, grandes soluciones”.

Materiales a base de carbón-*biochar* como soporte de nanopartículas para la regeneración de agua

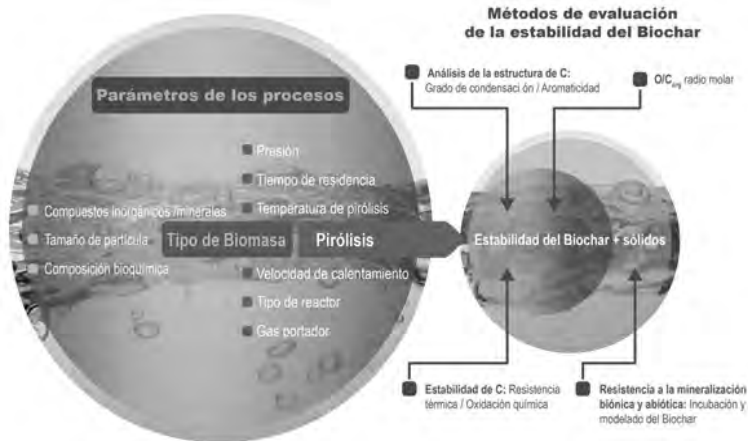
El *biochar* (o carbón vegetal) ha sido cada vez más reconocido como un material adsorbente multifuncional, debido a que se ha aplicado ampliamente en la purificación de agua, esto se debe primordialmente a las ventajas que ofrecen sus excelentes propiedades tales como la alta capacidad de adsorción derivado de la porosidad y diversos grupos químicos funcionales que se encuentran en su superficie. Por ello en los siguientes apartados se contemplan algunas posibles opciones para su utilización factible en procesos dirigidos a la remediación de agua (Lu et al., 2020).

Carbón-biochar y nanopartículas magnéticas

Con relación a la búsqueda de soluciones que se encaminan a la aplicación práctica del *biochar*, un método eficiente y que permite la separación efectiva sin alterar su capacidad de adsorción durante el tratamiento de aguas residuales, es la incorporación de nanopartículas magnéticas soportadas en el *biochar* (Chenab et al., 2020). Al respecto, los mecanismos de preparación del *biochar* magnético con nanopartículas de Fe incluyen la reducción química de especies, la modificación de superficies y la coprecipitación. Otros medios magnéticos, como lo son las nanopartículas ferromagnéticas tipo espinela (MgFe_2O_4 , MnFe_2O_4 y CoFe_2O_4) (Morales-Amaya et al., 2021) magnetic nanoparticles (MNPs).

Por otra parte, Chen et al. (2011) prepararon un *biochar* magnético a partir de cáscara de naranja y magnetita mediante el método de síntesis de coprecipitación química de hidróxidos de hierro en polvo de cáscara de naranja, para posteriormente realizar un tratamiento de pirólisis (ver Figura 1). Seguido de esto, encontraron que la capacidad de adsorción de compuestos derivados de la industria petroquímica empleando los *biochars* magnéticos aumentó varias veces en comparación con los *biochars* no magnéticos, lo que indica su potencial aplicación ambiental.

Figura 1. Parámetros a considerar para la preparación del biochars



Fuente: Después de Chen et al. (2011).

Por lo tanto, hay que resaltar que la enorme ventaja en cuanto a la aplicación factible en la eliminación de contaminantes del agua empleando un *biochar* magnético en comparación con un *biochar* no modificado es la particularidad de ser fácilmente recuperable y reciclable, consiguiendo con esto, aminorar una contaminación secundaria que las nanopartículas pudieran ocasionar.

Por ejemplo, mediante biochar magnético se pueden remover una amplia gama de contaminantes mediante procesos de sorción, tales como aniones inorgánicos, metales pesados y contaminantes orgánicos (Fröhlich et al., 2019). Además, el anclaje de nanopartículas magnéticas al *biochar* mejora la actividad de reducción catalítica para metales pesados y la actividad de degradación para contaminantes orgánicos (Fu et al., 2019). Por lo tanto, los trabajos futuros que apunten a una síntesis más ecológica de *biochar* magnético con mayor adsorción y actividad catalítica deben ser considerados para el futuro cercano.

Carbón-biochar y nanopartículas fotocatalíticas

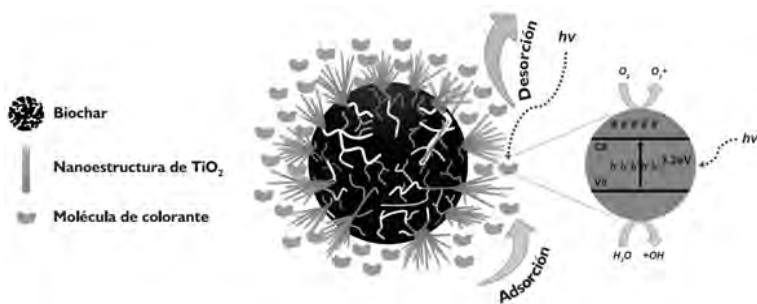
A pesar de los desafíos vinculados con la complejidad natural de la biomasa para obtener el *biochar*, se han dedicado esfuerzos intensos al desarrollo de *biochars* funcionales hacia la reducción más eficiente de contaminantes. En este sentido, las propiedades de absorción del *biochar* aunada con los Procesos de Oxidación Avanzada (POA) podrían aumentar la eficiencia en el tratamiento de contaminantes emergentes, dado que los procesos como la oxidación fotocatalítica, foto-Fenton, electro-Fenton, UV/H₂O₂, de ozonización, no transfieren el contaminante, sino que lo convierten en un metabolito secundario o mineralizan el compuesto químico (Babu et al., 2019).

Con relación a esto, en el proceso de fotocatálisis un semiconductor soportado puede considerarse un material compuesto, ya que no resulta de enlaces químicos (Elizalde-González y Lozano-Morales, 2019). Además, las propiedades y la funcionalidad, como resultado de la mezcla, del compuesto son diferentes de sus componentes individuales. En este sentido, el biochar a partir de diferentes precursores y con diferentes características se ha explorado como soporte de fotocatalizadores. Hasta ahora, de las nanopartículas que se han utilizado como fotocatalizadores, tales como RuO₂, TiO₂, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, ZrO₂, ZnO, CdS y ZnS, las nanopartículas de TiO₂ han recibido una atención relevante, debido a su estabilidad química, baja toxicidad, bajo costo, disponibilidad y alta sensibilidad a la iluminación con luz ultravioleta.

En consecuencia, las propiedades fisicoquímicas únicas del *biochar* pueden potencializarse al incorporar nanopartículas fotocatalíticas. Con respecto a esto, Elizalde-González y Lozano-Morales (2019) prepararon un compuesto de carbón activado a partir de cáscaras de soja mediante un proceso de carbonización a baja temperatura, con un rendimiento del 27%. Se obtuvo un compuesto de nanobelts de carbono TiO₂ (TNB/SC) por un método hidrotérmico en una solución acuosa de NaOH. De acuerdo con los resultados de las isoterma de adsorción de nitrógeno revelaron que el método hidrotérmico también sirvió en la activación del soporte carbonoso del material compuesto.

Los resultados de HPLC de la fotocatalisis del colorante amarillo básico-28 (BY-28), usando el compuesto TNB/SC como catalizador, revelaron que después de una reacción de 30 min, se observó que los fotoproductos probablemente fueron adsorbidos por el compuesto (ver Figura 2).

Figura 2. Efecto sinérgico de composito a base biochar con nanopartículas 1-D de TiO_2



Fuente: Después de Elizalde-González y Lozano-Morales (2019).

A la par, la eficiencia de decoloración fue del 95% empleando nanobelts y del 55% con el material compuesto (TNB/SC) después de 30 min de reacción. Sin embargo, la decoloración en el material compuesto ocurre por una formación combinada de fotoproductos y su adsorción, y no por la mineralización debido solo a la fotocatalisis. La obtención del compuesto TNB/SC ofrece la ventaja de tener los nanobelts sobre un soporte de carbono, lo que facilita la recuperación del catalizador para la industrialización y posibles aplicaciones prácticas.

En resumen, el resultado del acoplamiento de la fotoactividad del semiconductor con la retención del contaminante en los poros del *biochar* se considera en la literatura como un efecto sinérgico, que conduce a una transformación más eficiente por fotodegradación sobre un compuesto. En general, los resultados han demostrado que los compuestos de carbón activado con TiO_2 producen mayores eficiencias de degradación fotocatalítica y ofrecen una opción eficiente para la remoción

de colorantes, fármacos, herbicidas, iones metálicos, entre otros (Lozano-Morales et al., 2019).

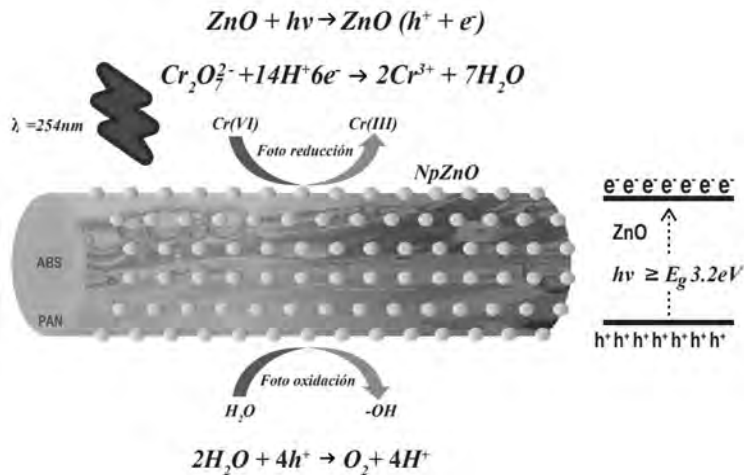
Materiales fibrosos poliméricos como soporte de nanopartículas para la regeneración de agua

Una creciente tendencia enfocada a las aplicaciones de la nanotecnología en el diseño y fabricación de membranas se ha centrado en perseguir efectos sinérgicos, es decir, obtener materiales multifuncionales mediante la agregación de nanopartículas en materiales fibrosos poliméricos que componen a las membranas para filtración y regeneración de agua. Ahora bien, los nanomateriales principalmente utilizados para tales aplicaciones incluyen nanopartículas cerámicas; por ejemplo, Al_2O_3 , ZnO , TiO_2 y zeolitas (Kannan et al., 2020); nanopartículas antimicrobianas, por ejemplo, Ag y nanotubos de carbono; y nanomateriales fotocatalíticos, por ejemplo, nanopartículas bimetalicas, SnO_2 , ZnO , WO_3 , TiO_2 , entre otras (Karthikeyan et al., 2020).

También, una de las intenciones encaminadas, al agregar nanopartículas de óxidos metálicos hidrofóbicos (repelentes al agua) a las membranas que están compuestas por fibras poliméricas, es reducir el ensuciamiento al aumentar la hidrofobicidad superficial de la membrana (Wassel et al., 2020). En este sentido, la adición de nanopartículas de óxidos metálicos, que incluyen alúmina, sílice, zeolita, ZnO y TiO_2 , a las membranas de ultrafiltración polimérica han demostrado que aumenta la hidrofobicidad de la superficie de la membrana, la permeabilidad al agua y la resistencia al ensuciamiento. Además, la incorporación de nanopartículas inorgánicas también contribuye a mejorar la estabilidad mecánica y térmica de las membranas poliméricas, reduciendo el impacto negativo de la compactación y el calor sobre la permeabilidad de la membrana (Morales et al., 2021). En este sentido, las membranas incorporadas con nanopartículas catalíticas (también conocidas como membranas reactivas) combinan su función de separación física y la reactividad de un catalizador para remoción de especies contaminantes en el agua, consiguiendo efectos sinérgicos.

Particularmente, un avance significativo en este contexto lo llevaron a cabo Morales et al. (2021) quienes abordaron la técnica de electrohilado coaxial como un enfoque versátil y sencillo para la preparación de fibras micrométricas de poli (acrilonitrilo-butadieno-estireno)/poliacrilonitrilo (ABS/PAN-núcleo/coraza) cargadas con nanopartículas de ZnO con el fin de evaluar su eficiencia en la fotoreducción de iones Cr VI en soluciones acuosas (ver Figura 3). Los resultados mostraron que los materiales obtenidos con diferentes cantidades de nanopartículas de ZnO exhibieron un alto potencial para la producción de nuevas membranas, con una eficiencia de remoción de hasta aproximadamente del 81.59%, en concentración de sustrato de 50 mg/L (Morales et al., 2021).

Figura 3. Esquema catalítico de la fotoreducción de Cr (VI), mediante nanopartículas de ZnO embebidas en fibras poliméricas coaxiales compuestas por ABS/PAN



Fuente: Después de Morales et al. (2021).

Estos resultados evidencian que las fibras ABS/PAN-con nanopartículas de ZnO son candidatos prometedores para aplicaciones relacionadas con la remediación ambiental como

los filtros para la regeneración de agua contribuyendo así parcialmente al desarrollo de tecnologías sostenibles.

Referencias bibliográficas

- Babu, D. S., Srivastava, V., Nidheesh, P. V. y Kumar, M. S. (2019). Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes. *Science of the Total Environment*, 696, 133,961. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133961>
- Chen, B., Chen, Z. y Lu, S. (2011). A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate. *Bioresource Technology*, 102(2), 716-723. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.067>
- Chenab, K. K., Sohrabi, B., Jafari, A. y Ramakrishna, S. (2020). Water treatment: functional nanomaterials and applications from adsorption to photodegradation. *Materials Today Chemistry*, 16, 100,262. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100262>
- Elizalde-González, M. P. y Lozano-Morales, S. A. (2019). Composite functioning as trap of photoproducts: TiO₂ nanobelts anchored to carbon particles. *Materials Chemistry and Physics*, 228, 15-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.02.014>
- Fröhlich, A. C., Foletto, E. L. y Dotto, G. L. (2019). Preparation and characterization of NiFe₂O₄/activated carbon composite as potential magnetic adsorbent for removal of ibuprofen and ketoprofen pharmaceuticals from aqueous solutions. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.037>
- Fu, H., Ma, S., Zhao, P., Xu, S. y Zhan, S. (2019). Activation of peroxymonosulfate by graphitized hierarchical porous biochar and MnFe₂O₄ magnetic nanoarchitecture for organic pollutants degradation: Structure dependence and mechanism. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.207>
- Kannan, K., Radhika, D., Sadasivuni, K. K., Reddy, K. R. y Raghu, A. V. (2020). Nanostructured metal oxides

- and its hybrids for photocatalytic and biomedical applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, 281, 102,178. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102178>
- Karthikeyan, C., Arunachalam, P., Ramachandran, K., Al-Mayouf, A. M. y Karuppuchamy, S. (2020). Recent advances in semiconductor metal oxides with enhanced methods for solar photocatalytic applications. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154281>
- Lehutso, R. F., Tancu, Y., Maity, A. y Thwala, M. (2020). Aquatic toxicity of transformed and product-released engineered nanomaterials: An overview of the current state of knowledge. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 39-56. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.002>
- Lozano-Morales, S. A., Morales, G., López Zavala, M. Á., Arce-Sarria, A. y Machuca-Martínez, F. (2019). Photocatalytic treatment of paracetamol using TiO₂ nanotubes: Effect of pH. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr7060319>
- Lu, L., Yu, W., Wang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Zhang, Y., Wu, Y., Ullah, H., Xiao, X. y Chen, B. (2020). Application of biochar-based materials in environmental remediation: from multi-level structures to specific devices. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00041-7>
- Morales-Amaya, C. G., Alarcón-Herrera, M. T., Astudillo-Sánchez, P. D., Lozano-Morales, S. A., Licea-Jiménez, L. y Reynoso-Cuevas, L. (2021). Ferrous magnetic nanoparticles for arsenic removal from groundwater. *Water (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182511>
- Morales, G., Castro-Ruiz, A., Rodríguez-Tobías, H., Abraham, G. A., Rivero, G. y Lozano-Morales, S. A. (2021). Photocatalytic Reduction of Hexavalent Chromium Ions from Aqueous Solutions Using Polymeric Microfibers Surface Modified with ZnO Nanoparticles.

Fibers and Polymers. <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0217-5>

Wassel, A. R., El-Naggar, M. E. y Shoueir, K. (2020). Recent advances in polymer/metal/metal oxide hybrid nanostructures for catalytic applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 104,175. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104175>



**SECCIÓN IV. LA
PROPUESTA DE ABORDAJE
EPISTEMOLÓGICO**



LA CONTAMINACIÓN DEL RÍO ATOYAC COMO PROBLEMA PERVERSO (*WICKED PROBLEM*)¹

¹ Por la importancia que reviste el entendimiento de la complejidad de la problemática de la contaminación del río Atoyac, se anotan las acciones definidas por un grupo de investigadores (María et al., 2021), según las dimensiones estudiadas en el ejercicio del Arbol de Problemas: **Social:** Mejorar la calidad del agua del río Atoyac que usan los agricultores de las comunidades de Guadalupe Victoria y San Mateo A. para disminuir los conflictos que ocasiona el agua contaminada entre agricultores y los agricultores-CONAGUA; Establecer sistemas de seguimiento a la calidad del agua con fines agrícolas; Favorecer el acceso a agua de calidad proveniente del río para uso agrícola en las comunidades de estudio; Contribuir a la producción de alimentos libres de elementos tóxicos; Integrar a la comunidad en redes en temas de impacto ambiental. **Ambiental:** Promover Educación ambiental (conciencia ambiental), luego de resuelto los problemas tecnológicos; Establecer las bases de transferencia del conocimiento científico a la solución de problemas socioambientales; Realizar la capacitación del uso adecuado del suelo para la producción agrícola; Reducir el número de contaminantes del agua de uso agrícola; Fomentar buenas prácticas agropecuarias; Reforestación varias especies (Forestales, frutales, ornato). **Política:** Proponer un nuevo modelo de gobernanza del agua, que contemple una efectiva participación de instancias gubernamentales, ciudadanía y academia; Diseñar e implementar políticas públicas para la restauración del río Atoyac con la participación de los diferentes agentes sociales involucrados; Elaborar e implementar planes integrales para la restauración del río Atoyac. **Científico-tecnológico:** Desarrollo de un Modelo Científico-Comunitario para el mejoramiento de calidad del agua del río Atoyac en las comunidades de estudio. **Económico:** Llevar a las comunidades de estudio las herramientas técnicas en el tema de medio ambiente a los actores locales; Construir un modelo integral para la restauración ecológica y sanitaria, con la participación de la comunidad involucrada, que oriente las inversiones de obra pública de cualquiera de las instancias de gobierno; Modernizar el marco jurídico, en uno articulado donde la protección al ambiente tenga su contraparte ante la producción y generación de riqueza; Caracterizar y diagnosticar la región, con sus particularidades, de manera multidisciplinaria, con la gestión de la comunidad, con el fin de proponer un modelo restauración de las zonas afectadas, según sus prioridades. Se observa que, de manera general, las acciones descritas en el libro al que pertenecen este y los demás capítulos, no consideraron las acciones propuestas. Por ello se decidió que el presente capítulo sobre los *wicked problems*, se insertara en la parte última para no distraer a los lectores con este paradigma y las acciones que proponen los autores. Ello permitirá en una siguiente etapa, estudiar cómo se abordan metodológicamente los *wicked problems* y definir las acciones pertinentes en términos de los avances según un abordaje cada vez más próximo a la transdisciplinariedad y no solo el concurso de varias disciplinas.

Introducción

El método científico

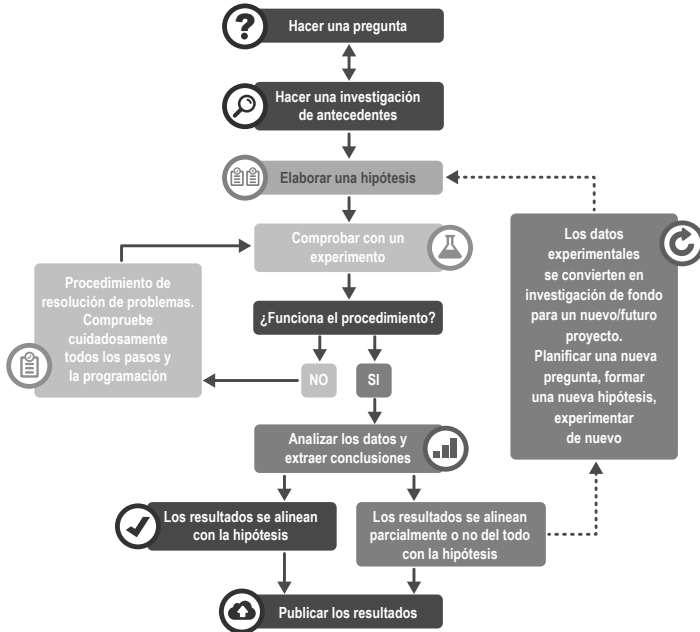
Se puede decir que el método científico es una forma de aprender o un proceso de utilización del pensamiento crítico comparativo. Las cosas que no son comprobables o falsables de alguna manera científica o matemática, ahora o en el futuro, no se consideran ciencia (Science buddies, 2021). Para Asensi y Parra (2002) “el método científico y la capacidad de la razón nos permiten seguir avanzando en busca de la verdad y la creación de modelos para aumentar nuestro conocimiento científico del mundo” (p. 9), lo que ayuda a explicar la necesidad de su enseñanza. Para Bribiesca y Merino (2008): “esta imagen de la investigación científica corresponde a la visión positivista desarrollada durante el siglo XIX, que con algunas variantes arraiga en el siglo XX, principalmente en el campo de la filosofía de la ciencia” (p. 80) y que se extiende hasta nuestros días como se puede constatar en las estructuras de los artículos científicos de las revistas especializadas. El método científico que se enseña en las universidades y se aplica en los institutos de investigación tiene la forma de la Figura 1. Se describe de la siguiente manera:

1. Hacer una pregunta a partir de un problema que se ha observado, de preferencia medible y cuantificable.
2. Investigar los antecedentes para tomar en cuenta los logros y obstáculos encontrados relacionados con el problema de investigación.
3. Plantear una hipótesis que permita hacer una predicción.
4. Poner a prueba la hipótesis mediante experimentación y repetir experimento varias veces para asegurar los resultados.
5. Analizar los datos, obtener resultados y sacar conclusiones.
6. Publicar resultados.

² mariaramirez.andres@coltlax.edu.mx

En la Figura 1 se muestra las etapas convencionales del Método Científico. Esta estructura se observa en universidades y Centro de Estudios como la Universidad Iberoamericana (IBERO³), el Colegio de Postgraduados (Duché, 2020) y revistas científicas nacionales e internacionales.⁴

Figura 1. Etapas del método científico



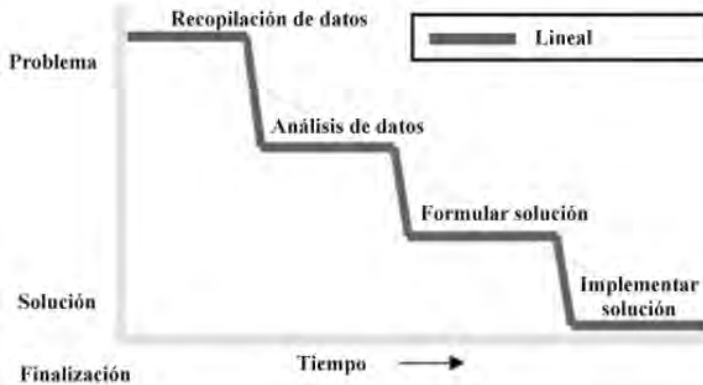
Fuente: Capítulo I de esta obra, elaborado por Andrés María Ramírez.

A esta forma de abordar los problemas suele llamársele método de cascada, que se representa en la Figura 2. Puede observarse que ella se corresponde con el llamado método científico de uso común en las investigaciones llamadas *científicas* (ver Figura 1).

³ <https://ibero.mx/sites/all/themes/ibero/descargables/estructuraynormatividad/criterios-procedimientos-normas-maestria-doctorado.pdf>

⁴ <https://www.soils.org/publications/journals/author-resources/ssaj-instructions/>

Figura 2. Método de Cascada con las etapas de investigación convencionales



Fuente: elaboración propia, con base en Conklin (2005).

Drugus (2010) menciona que Chomsky divide las cuestiones científicas en *problemas* que son, al menos, potencialmente respondibles, y *misterios*, que no lo son. Por su parte, Escutia (2020) afirma que “Chomsky acepta que hay auténticos “*misterios*”, cuestiones intelectualmente insuperables o que incluso no llegamos ni a plantearnos, distintos de los “*problemas*”, que se mantienen dentro de los límites de nuestro entendimiento, aunque sigan sin resolverse” (p. 5).

Shepard (1998) reflexiona al respecto, que nuestra especie vivió antaño (y en algunos pequeños grupos aún lo hace) en armonía estable con el entorno natural. Eso no se debía a que los hombres fueran incapaces de cambiar su entorno o carecieran de perspicacia y formula la pregunta *¿por qué los hombres se empeñan en destruir su hábitat?* Por un lado, parte de la respuesta la da Dasgupta (2021): en la actualidad, nosotros mismos, junto con el ganado que criamos para alimentarnos, constituimos el 96% de la masa de todos los mamíferos del planeta. Solo el 4% es todo lo demás: desde elefantes hasta tejones, desde alces hasta monos. Y el 70% de todas las aves vivas en este momento son aves de corral, en su mayoría pollos para que nos los comamos. Por otro lado, e igual de importante, está el capitalismo, en su

forma actual de neoliberalismo, desde hace al menos cuatro décadas (pp. 1-2).

Fisher (2014) la refiere como la teoría económica medioambiental dominante, y dice que las soluciones propuestas basadas en el mercado para los problemas del cambio climático y la destrucción de la biodiversidad, la teoría de la externalidad, la teoría de la privatización y el optimismo tecnológico, tienen pocas posibilidades de resolver estos problemas en la realidad (p. 165). En el entorno de la COVID-19, IPBES (2020) reporta que la alteración ecológica humana y el consumo insostenible impulsan el riesgo de pandemia (p. 2). UNEP (2021) refiere que, dado que la perturbación ecológica humana y el consumo insostenible impulsan el riesgo de propagación zoonótica, es necesario abordar los impactos adversos de los humanos en la naturaleza para frenar las pandemias y advierte que las cargas ambientales asociadas a la contaminación, la escasez de recursos y los fenómenos extremos acentúan las desigualdades socioeconómicas y se prevé que aumenten con las actuales trayectorias de desarrollo. Por ejemplo, las presiones medioambientales y sus efectos sobre la salud y el bienestar recaen especialmente en los grupos ya vulnerables o desfavorecidos (pp. 94-95).

El origen del problema

Al reconstruir el proceso de contaminación del río Atoyac, los habitantes que se han entrevistado ubican su origen en la llegada en 1969, de la Unidad Petroquímica Texmelucan, que desde 1985 se llamó Complejo Petroquímico Independencia de PEMEX (Cámara de Diputados, s.f.). Ello coincidió con el gobierno en Tlaxcala de Anselmo Cervantes Hernández (1963-1969) en cuyo mandato se crea la Comisión de Desarrollo Industrial del Estado de Tlaxcala, que encamina sus esfuerzos hacia el objetivo de ampliar la planta industrial (Valdiviezo, 2009).

Valerdi (2008) explica ese momento, argumentando que el apoyo al modelo de desarrollo industrial estaba ligado a la idea de “progreso”, como la vía ideológica en la que el progreso se vincula con el bienestar de la población (p. 185), progreso que, según Shepard (1998) comenzó hace entre cinco y diez mil años

y se hizo más destructivo y menos responsable con el progreso de la civilización.

Por su parte, Ramírez y López (2018) explican que las tierras y aguas del sur de Tlaxcala experimentaron una ola expansiva industrial con la construcción de la autopista México-Puebla en 1962, la planta armadora de la Volkswagen en 1964 y el Complejo Petroquímico Independencia en 1969, que da lugar a una región de articulación económica entre el centro, el sureste y el golfo del país con un sistema carretero intrarregional (p. 96).

Rosales (2003) refiere que recién que inicia el proceso de instalación de la base industrial en 1969, Tlaxcala se ve introducida en la categoría de parques industriales consolidados, lo que aumenta las exigencias fiscales y de infraestructura que construir, pasando por un proceso de industrialización tardía que le obliga a experimentar una liberalización que precede al cambio a un modelo de apertura económica (p. 144). También, según Valerdi (2005):

El proceso de industrialización [moderno] en Tlaxcala está ligado a un nombre; el de Emilio Sánchez Piedras, Gobernador de 1975-1981, [quien] inspirado en las teorías desarrollistas de la época, que postulaban la sociedad de pleno empleo, bajo el auspicio del Estado, impulsa la creación de la industria y promueve la inversión en Tlaxcala. (p. 151)

Sin embargo, aunque ciertamente la gravedad por contaminación del río Atoyac puede atribuírsele a la Petroquímica de Texmelucan, es de la mayor importancia, atender la afirmación de Velasco (2014) que indica que desde la Colonia, los obreros textiles habrían utilizado las fuentes de agua para su producción y, en el Siglo XIX los ríos Atoyac y Zahuapan permitieron la instalación de las primeras fábricas textiles que trabajaban con fuerza hidráulica (p. 2) constituyéndose así en la primera fuente de contaminación. Según la autora:

Por ejemplo, para el blanqueado, teñido y acabado de la lana para productos como los casimires y sarapes se utilizaban soluciones cáusticas que eran vertidas a las corrientes de agua. No obstante, el grado de contaminación de entonces era tal que los procesos biológicos naturales lograban disolver estas sustancias y el río contaba con una buena calidad. (p. 115)

Ramírez (1999; como se citó en Valdiviezo, 2009) señala que: “El 6 de octubre de 1937, el gobernador Isidro Candia expide una importante ley de protección económica destinada a facilitar la industrialización” (p. 117). Santibáñez (2010), anota que es hasta la creación del Banco de Avío para el fomento de la industria nacional, el 16 de octubre de 1830, que se vislumbran nuevas expectativas para la instalación de fábricas textiles con moderna maquinaria (pp. 25-26). Bajo los auspicios de dicho banco comenzó, en efecto, un primer intento de mecanización de la industria textil en Tlaxcala, cuando en “1832 se formó una sociedad con el objeto de establecer una fábrica de algodón y lana” (Heath Constable, 1982; como se citó en Santibáñez, 2010, p. 26).

De acuerdo con lo anterior, después del porfiriato, Tlaxcala tenía en su futuro a la industrialización, que en el siglo XX se concreta con el Lic. Emilio Sánchez Piedras y que continúa hasta la fecha: “Se reúne Marco Mena con empresarios de Pimsa para analizar posibilidades de inversión en Tlaxcala” (Armas, 2019); o bien:

“Traeremos empresas serias internacionales a realizar proyectos que generen desarrollo y bienestar en beneficio de los tlaxcaltecas.”, se escribió el día 18 de julio en el mensaje 3/3 en la cuenta de Twitter de Lorena Cuéllar. Y dos y tres días después en medios impresos y electrónicos se publicó: “Ofrece Lorena Cuéllar traer las empresas más importantes del mundo para que generen empleo.” (20 de julio, 2021) y que “En agosto, empresas extranjeras se instalarán en Tlaxcala... para aumentar la oferta laboral y, con ello, reactivar la economía de la entidad”. (Pohls, 2021)

Entendido lo anterior como “Progreso”, que Zerzan (2015) relaciona con velocidad, e indica que el progreso “en velocidad”, por así decirlo, acentúa el avance de la catástrofe ecológica; la naturaleza está sistemáticamente sobrecargada y, por supuesto, la aceleración es su medida. En tanto Kaczynski (2010) hace una reflexión interesante sobre ese progreso e indica que a medida que avanzaba la Revolución Industrial, la sociedad moderna creó para sí misma un mito autocomplaciente, el mito del “progreso”: desde la época de nuestros remotos ancestros simiescos, la historia de la humanidad había sido una marcha incesante hacia un futuro

mejor y más brillante. Todo el mundo acogía con alegría cada nuevo avance tecnológico: la cría de animales, la agricultura, la rueda, la construcción de ciudades, la invención de la escritura y del dinero, los barcos de vela, la brújula, la pólvora, la imprenta, la máquina de vapor y, por fin, el logro humano más importante: la sociedad industrial moderna. Para México y Tlaxcala, Haber (1993) coincide con lo mencionado por Kaczynski (2010):

A mediados del Siglo XX, la economía mexicana estaba dominada por la agricultura. La mayoría de la población vivía en pueblos rurales, y la política era una abstracción que interesaba sólo a una pequeña élite cuya riqueza estaba basada en el comercio y la agricultura. Para mediados del siglo XX la industria dominaba la economía nacional, la mayor parte de la población vivía en ciudades y la política ya interesaba a medida que el capital y el trabajo industriales hacían demandas al Estado. En el fondo de esta transformación se encontraba un solo factor: la transición de México a una economía industrial. (p. 649)

Lo referido hasta aquí, en resumen, nos indica dos situaciones esclarecedoras: las problemáticas como las de este estudio tienden a ser resueltas mediante el llamado método científico, de epistemología lineal y, como fondo subyacente de la contaminación del Alto Atoyac, está el paradigma del “progreso” que, hasta el día de hoy, como se vio antes, sigue siendo un eje rector de la política pública en Tlaxcala.

Los *Wicked Problems*

Vitasek (2014) refiere que Rittel acuñó el término “problema perverso” (*wicked problema*) a mediados de la década de 1960 en unas conferencias en las que alentaba la responsabilidad moral de los investigadores operativos de informar al directivo de los aspectos en los que nuestras “soluciones” no han logrado domar (domesticar) sus problemas perversos.

Los problemas de la política social están ligados a la naturaleza de problemas “perversos” en tanto que la ciencia se ha desarrollado con problemas “domesticados (*tame problems*); para éstos está claro qué se pretende al abordarlos y si se han resuelto o no al final de la investigación, en tanto que los

primeros, no tienen esos rasgos clasificatorios e incluyen casi todas las cuestiones de política pública (Rittel y Weber, 1973, p. 160). Según Rittel y Weber (1973), las características de los *wicked problems*, son:

1. No existe una formulación definitiva de un *wicked problem*
2. Los *wicked problems* no tienen una fecha para ser resueltos; El investigador deja de trabajar en un problema complejo, no por razones inherentes a la “lógica” del problema sino por consideraciones externas al problema: se le acaba el tiempo, el dinero o la paciencia.
3. Las soluciones a los *wicked problems* no son verdaderas o falsas, sino buenas o malas.
4. No hay una prueba inmediata ni definitiva de una solución a un problema perverso (En el caso de los problemas “domados o domésticos” se puede determinar in situ lo bueno que ha sido un intento de solución. Para ser más exactos, la prueba de una solución está totalmente bajo el control de las pocas personas implicadas e interesadas en el problema. En cambio, en los problemas complejos, cualquier solución, una vez aplicada, generará una serie de consecuencias a lo largo de un período de tiempo prácticamente ilimitado).
5. Con los problemas de planificación perversos, cada solución implementada es consecencial. Deja “huellas” que no pueden deshacerse. No se puede construir una autopista para ver cómo funciona, y luego corregirla fácilmente después de un rendimiento insatisfactorio; cada intento de revertir una decisión o de corregir las consecuencias no deseadas plantea otra serie de problemas perversos, que a su vez están sujetos al mismo dilema.
6. Los problemas complejos no tienen un conjunto enumerable (o exhaustivamente describable) de soluciones potenciales, ni existe un conjunto bien descrito de operaciones permisibles que puedan incorporarse al plan: No hay criterios que permitan demostrar que se han identificado y considerado todas las soluciones a un problema complejo.
7. Cada problema perverso es esencialmente único; por “esencialmente único” se quiere decir que, a pesar de las largas listas de similitudes entre un problema actual y otro anterior, siempre puede haber una propiedad distintiva adicional que tenga una importancia primordial. Parte del arte de enfrentarse a los problemas complejos es el arte de no saber demasiado pronto qué tipo de solución aplicar.
8. Todo problema perverso puede considerarse un síntoma de otro problema; los problemas pueden describirse como discrepancias entre el estado de

- cosas tal como es y el estado como debería ser. El proceso de resolución del problema comienza con la búsqueda de la explicación causal de la discrepancia. La eliminación de esa causa plantea otro problema del que el problema original es un “síntoma”. A su vez, puede considerarse el síntoma de otro problema de “nivel superior”. Cuanto más alto sea el nivel de formulación de un problema, más amplio y general se vuelve: y más difícil resulta hacer algo al respecto. Por otra parte, no hay que tratar de curar los síntomas: y por lo tanto hay que tratar de resolver el problema en el nivel más alto posible.
9. La existencia de una discrepancia que representa un problema perverso puede explicarse de numerosas maneras. La elección de la explicación determina la naturaleza de la resolución del problema. Por ejemplo, “la delincuencia en las calles” puede explicarse por no tener suficiente policía, por demasiados delincuentes, por leyes inadecuadas, por demasiada policía, por privación cultural, por falta de oportunidades, por demasiadas armas, por aberraciones frenológicas, etc. Cada una de ellas ofrece una orientación para atacar la delincuencia en las calles. ¿Cuál es la correcta? No existe ninguna regla o procedimiento para determinar la explicación o combinación “correcta”. La razón es que, al tratar problemas perversos, hay más formas de refutar una hipótesis que las permitidas en la ciencia convencional.
 10. El planificador no tiene derecho a equivocarse. Es un principio de la ciencia que las soluciones a los problemas son sólo hipótesis que se ofrecen para su refutación y cuanto más resiste una hipótesis los numerosos intentos de refutación, mejor se considera su “corroboración”. En consecuencia, la comunidad científica no culpa a sus miembros por postular hipótesis que luego son refutadas. En el caso de los problemas perversos no se tolera esa inmunidad. Aquí el objetivo no es encontrar la verdad, sino mejorar algunas características del mundo en el que viven las personas. Los planificadores son responsables de las consecuencias de las acciones que generan (Rittel y Weber, 1973, pp. 161-167).

Kolko (2012) refiere que, según estas características, no todos los problemas de difícil solución son perversos, aunque la mayoría de los problemas sociales -como la desigualdad, la inestabilidad política, la muerte, la enfermedad o el hambre [la contaminación de los ríos]- son perversos. No se pueden “arreglar”, pero los investigadores pueden desempeñar un papel

central en la mitigación de las consecuencias negativas de los problemas perversos y en el posicionamiento de la trayectoria general de la cultura en direcciones nuevas y más deseables, además, debido a las cualidades sistémicas de estos grandes problemas, se necesitan conocimientos de ciencia, economía, estadística, tecnología, medicina y política, entre otros, para lograr un cambio eficaz. Esto exige una colaboración inter [y trans] disciplinar y, sobre todo, perseverancia.

Markowska et al. (2019) refieren que la noción de *wicked problem*, iniciada en 1973, sigue siendo válida y se está desarrollando, y todavía sirve para ayudar a comprender mejor las situaciones difíciles y complejas a razón de que: los problemas perversos exigen la adopción de medidas no estándar; la metodología clásica y las estrategias convencionales no consiguen resultados satisfactorios con este tipo de problemas; los problemas perversos siguen siendo irresolubles; solo es posible mejorar las situaciones problemáticas. Esto ocurre en el proceso de indicar la mejor opción, aprobada por todos los participantes implicados, que no es necesariamente una solución óptima (p. 3).

Además, Peters (2017) señala también, que a las características presentadas explícitamente por Rittel y Webber se puede añadir el sentido general del debate de que los problemas perversos implican a múltiples actores y son social y políticamente complejos. El autor concluye que la naturaleza de los problemas perversos y/o complejos es que no habrá una solución mágica para resolverlos, pero una mejor comprensión de los problemas y de cómo se pueden procesar, puede ayudar a facilitar lo que pueden ser solo respuestas limitadas.

Además, como advierten Alford y Head (2017), debe tenerse cuidado con la tendencia a considerar muchos problemas como más perversos de lo que realmente son, en particular cuando un problema puede ser perverso en una dimensión, pero no tanto en otras. Y no menos importante es la observación de Camillus (2008, p. 3) referente a que de acuerdo con Rittel y Weber, un *wicked problem* puede tener algunas o todas las 10 características anotadas arriba y que ellas no son un conjunto de propiedades que determinan mecánicamente la perversidad;

más bien, proporcionan información que ayuda a juzgar si un problema es o no, perverso.

Metodología

Primeramente se buscó comprobar la metodología lineal en los trabajos de investigación científica relacionados con la contaminación de las aguas del río Atoyac en las fronteras de Tlaxcala y Puebla; después, de acuerdo con las características de los llamados *wicked problems* que de acuerdo a lo referido por los autores que reportan esos problemas en sus investigaciones, además de Rittel y Webber (1973), tengan concordancia con las características del problema de la contaminación en la región de estudio.

Para comprobar la metodología lineal epistemológicamente, se consultaron publicaciones científicas, principalmente del ámbito internacional, que tuvieran como tema principal, la contaminación del río Atoyac, revisando los apartados: *background, objective, methodology, results* y *conclusions*, que son los apartados metodológicos comúnmente exigidos por las publicaciones científicas nacionales e internacionales. Se dio preferencia a publicaciones en revistas internacionales. El análisis de la información se hace en el *Abstract* o resumen, que se considera, comprende los apartados mencionados arriba y se consignan en su totalidad para que, a su vez, sirvan de marco de referencia para entender qué tipo de investigaciones se han hecho en torno a la problemática de la contaminación del río Atoyac, aunque sin pretender con ello argumentar un estado del arte del problema. El resumen se analizó traducido al español, usando el traductor gratuito DeepL.⁵

Respecto a la contaminación del río Atoyac como un *wicked problem*, se tomó en cuenta la observación de Camillus (2008) referente a que un *wicked problem* puede tener algunas o todas las 10 características reportadas por Rittel y Weber (1973). Para ello se revisó la temática de los resúmenes, así como las palabras clave (*Key Words*) buscando su relación y si con ello

⁵ <https://www.deepl.com/es/translator>

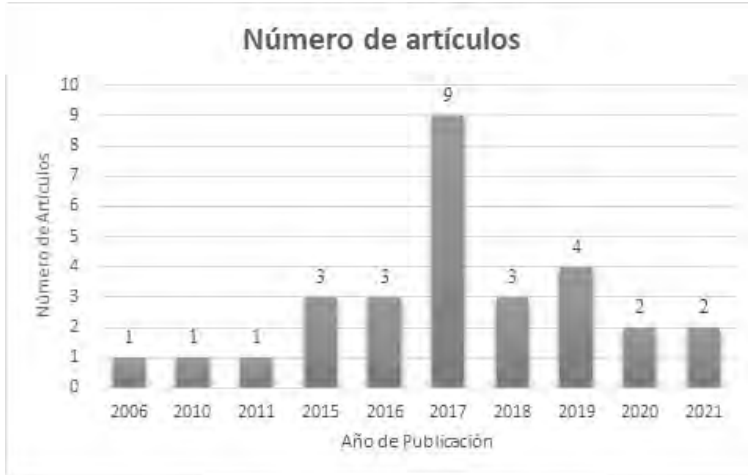
se definía el problema (no existe una formulación definitiva de un *wicked problem*), así como encontrar argumentos que puedan corresponder a algunas de las (10) características mencionadas por Rittel y Weber (1973). Este apartado se apoya en los resultados del Árbol de problemas, reportado por María et al. (2021).

Resultados y discusión

El método científico en las investigaciones sobre el Atoyac

Se revisaron 29 publicaciones, correspondientes a 26 artículos científicos, tres tesis, dos de Maestría y otra de Doctorado; de ellas, nueve hicieron referencia a la relación salud humana y contaminación, siete tuvieron relación principal con el medio ambiente, cinco se refirieron principalmente a aspectos de política, tres se refirieron a la producción de alimentos, tres a aspectos científicos y dos a aspectos económicos (31.0, 24.1, 17.2, 10.3, 10.3 y 6.9%, respectivamente). En la Figura 3 se muestra la distribución de las publicaciones en el tiempo respecto a la contaminación en el río Atoyac en la frontera de los estados de Tlaxcala y Puebla.

Figura 3. Artículos científicos publicados respecto a la contaminación en el río Atoyac en la frontera de los estados de Tlaxcala y Puebla



Fuente: elaboración propia.

Se observa que en 2017 es cuando más se publicó con respecto a la contaminación en el río Atoyac, con 9 artículos encontrados. También resalta que del 2017 al 2021 las publicaciones representan 69.0%, indicando ello la importancia que tiene el problema de investigación en la ciencia. Los apartados mencionados se muestran en la Tabla 1 para las publicaciones analizadas.

Tabla 1. Apartados metodológicos de los artículos publicados

Publicación	Antecedentes	Objetivo	Metodología	Resultados	Conclusiones
1).	0	1	1	1	1
2).	1	1	1	1	1
3).	1	1	1	1	1
4).	1	0	1	1	1
5).	1	0	0	1	1
6).	1	1	1	1	1
7).	1	1	1	1	1

La contaminación del río Atoyac como problema perverso (*wicked problem*)

8).	0	0	1	1	0
9).	1	1	0	0	1
10).	1	1	1	1	1
11).	1	1	1	1	1
12).	1	0	1	1	1
13).	1	1	1	1	1
14).	1	0	1	1	1
15).	1	0	1	1	1
16).	1	1	1	1	1
17).	1	1	1	1	1
18).	1	1	1	1	1
19).	1	0	1	1	1
20).	1	0	1	1	0
21).	0	1	1	1	1
22).	1	1	1	1	1
23).	1	1	1	1	1
24).	1	0	1	1	1
25).	1	1	1	1	1
26).	0	0	1	1	1
27).	0	1	1	1	1
28).	1	1	1	1	1
29).	0	0	0	1	1

*1) Castro-González et al. (2017); 2) Pérez-Castresana et al. (2018); 3) Handal et al. (2016); 4) Handal et al. (2015); 5) Martínez-Tavera et al. (2017); 6) Pérez-C. et al. (2019); 7) Montero et al. (2006); 8) Montero-Montoya et al. (2020); 9) Bolognesi et al. (2011); 10) The & Blomqvist (2017); 11) Soto y Ramírez-Fuentes (2017); 12) Pérez-C. et al. (2018); 13) López et al. (2016); 14) Tabla-Hernández et al. (2020); 15) Mora et al. (2021); 16) Hernández-Ramírez et al. (2019); 17) Flores et al. (2016); 18) Flores y de Boer (2015); 19) Ybarrarán et al. (2021); 20) Casiano y Bressers (2015); 21) Rodríguez-Espinosa et al. (2018); 22) Shruti et al. (2017); 23) Shruti et al. (2019); 24) Shruti et al. (2018); 25) Rodríguez-Tapia y Morales-Novelo

(2017); 26) Rodríguez-Rodríguez (2010); 27) Castro-González (2017); 28) Flores et al. (2019); 29) Aburto et al. (2017).

Fuente: elaboración propia.

Respecto a los apartados de: *background* (antecedentes), *objective* (objetivo), *methodology* (metodología), *results* (resultados) y *conclusions* (conclusiones), 44.8% reportó los cinco; 27.6% reportó cuatro; 20.7% consideró tres aspectos y 6.9% solo dos aspectos. Así mismo, se observa que 23 publicaciones mostraron el apartado **antecedentes**, 18 reportaron el **objetivo** de la investigación, 26 mencionaron la **metodología**, 28 consignaron los **resultados** y 27 hicieron referencia a las **conclusiones** (79.3, 62.1, 89.7, 96.5 y 93.1%, respectivamente. En general, ello muestra el método lineal en los trabajos de investigación analizados con respecto a la contaminación del río Atoyac. En este sentido, cobra importancia lo afirmado por Whyte (1995; como se citó en Yawson, 2015): La epistemología lineal o la ciencia normal, es en cierto modo una construcción artificial basada en el dominio de los Estados Unidos después de la Segunda Guerra Mundial (Whyte, 1995); coincidentemente, González-Casanova (2017) a su vez refiere que la tecnociencia “han recibido el máximo apoyo del complejo político-empresarial o militar-industrial que ha dominado en Estados Unidos y en el mundo por lo menos desde la Segunda Guerra Mundial.

Este pensamiento tradicional metodológico, como mencionan Rittel y Weber (1973), Conklin (2005), Lewis (2008), Kolko (2012), Varpio et al. (2017), entre otros, para trabajar un problema siguen un proceso ordenado y lineal, trabajando desde el problema hasta la solución, para ponerla en práctica. En cambio, los *wicked problems* se resisten a los planteamientos claros de los problemas, desafían los enfoques de análisis tradicionales y se niegan a una resolución definitiva. Por ello, Velthuizen (2012) afirma que se requiere una metodología que permita salir de las restricciones asfixiantes del pensamiento sistémico y de los procesos lineales para adentrarnos en el espacio interior de la confluencia de las disciplinas.

Por su parte, Levin (2007) señala que el desarrollo de este enfoque tradicional plantea un serio dilema para la teoría de las

ciencias sociales en dos aspectos. En primer lugar, la corriente principal de las ciencias sociales se ha basado en el examen del pasado y en centrarse en cuestiones de investigación medibles y en gran medida cuantificables, y por otra, la mayoría de los científicos sociales que trabajan para descubrir o desarrollar explicaciones generales dudan en aplicar sus esfuerzos para intervenir en problemas mundiales concretos, como son los *wicked problem*.

La contaminación del río Atoyac como Wicked Problem

Criterio 1 de Rittel y Weber (1973): “no hay una formulación definitiva de un problema perverso”

Con respecto a la primera característica de los *wicked problems* según Rittel y Weber (1973) “no hay una formulación definitiva de un problema perverso” se puede asumir con la lectura de los títulos de las publicaciones, que el o los autores en lo particular delimitan un problema y lo hacen su objeto de estudio, definiendo implícita o explícitamente el problema. El análisis de las palabras clave (*Key Words*), para intentar relacionar las más frecuentes con el problema y su definición, en 20 de las publicaciones que las contuvieron, dio los resultados que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Publicación/palabras clave de la investigación

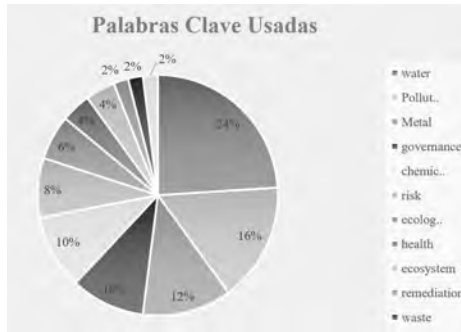
1). Heavy metals; health risk; cancer risk; soil polluted
2). Atoyac River; water pollution; heavy metals; coliforms; Emilio Portes Gil; Puebla
3). Physicochemical parameters, Seasonal variations, Multivariate statistics, Atoyac River basin, Mexico
4). water well; spring water; pollution water; risk evaluation; Atoyac river; E. Portes Gil
5). Río Atoyac, water contamination, environmental impact, sustainable development
6). Water quality, river restoration, contingent valuation, distance decay, Puebla in Mexico.
7). Atoyac River; water pollution; heavy metals; coliforms; Emilio Portes Gil; Puebla

8). Aquatic ecosystem recovery, In situ remediation, Ozone microbubbles treatment, Urban polluted reservoir, Water quality improvement
9). Heavy metals, Agrochemicals, Microplastics, Pharmaceuticals, Microbiological pollution, Urban river
10). Real-time, Anomalies, Pollutants, Water Quality Monitoring System
11). Mexico; water governance; governance assessment; sanitation; water treatment plants policy; Tlaxcala sub-basin
12). Water governance, Governance assessment, Symbolic implementation, Puebla's Atoyac basin
13). Economic valuation, ecosystem services, water contamination, Puebla, Mexico
14). Fluvial sediments, Acid leachable metals, Geochemical indices, Potential ecological risk index, Atoyac River basin, Mexico
15). Fluvial sediments, Chemical weathering, Pollution indices, Volcano, Puebla, Mexico
16). Microplastics, Emerging contaminant, SEM/EDX, Sediments, Atoyac River basin, Mexico
17). Ash samples, Metals, Geochemical indices, Potential ecological risk index, Human health risk assessment, Popocatepetl volcano, Mexico
18). Ecological models; gastrointestinal diseases; health-disease function; water pollution
19). Aguas residuales; Índice de geoacumulación; Factor de enriquecimiento; Metales pesados
20). Water governance; governance assessment; wastewater governance; Mexico; comparative governance

Fuente: elaboración propia.

Expresando los resultados de la frecuencia de esas palabras clave, el resultado es como se muestra en la Figura 3:

Figura 3. Frecuencia de las palabras clave en los artículos publicados



Fuente: elaboración propia.

Como se observa, 24.0% hizo referencia al término “water” (agua); seguido por “pollution” con 16.0%, luego “metal” con 12.0% y en cuarto lugar “governance” con 10.0%. Ello difiere con lo reportado arriba (nueve hicieron referencia a la relación salud humana y contaminación, siete tuvieron relación principal con el medio ambiente, cinco se refirieron principalmente a aspectos de política, tres se refirieron a la producción de alimentos, tres a aspectos científicos y dos a aspectos económicos), lo que indica que las palabras clave (*Key Words*) no necesariamente coinciden o describen la temática del resumen científico.

Esta indefinición del problema que reportan Rittel y Weber (1973), se corresponde con lo que afirman Huang y London (2016) respecto a la indeterminación en la formulación de problemas: la evaluación de los impactos acumulativos implica a múltiples partes interesadas, que definen las fuentes de contaminación y las implicaciones para la salud desde diferentes perspectivas. Es muy difícil, si no imposible, llegar a un consenso sobre los factores que deben tenerse en cuenta.

De este modo, Cattani et al. (2012) con una visión holística consideran los siguientes problemas a considerar en la restauración de la Cuenca, desde las esferas del Poder del Gobierno, Poder de la Comunidad, Poder de las Industrias y Poder del Medio Ambiente, como se observa en la Figura 4:

Figura 4. Problemas a resolver en las dimensiones de cuatro poderes



Fuente: Capítulo I de esta obra, elaborado por Andrés María.

En la Figura 5 se muestra lo reportado por María et al. (2021), que llegan a ese resultado aún sin el concepto de *wicked problem*:

Figura 5. Dimensiones de los problemas a resolver



Fuente: Capítulo I de esta obra, elaborado por Andrés María.

En ambas figuras (4 y 5), se observa la concordancia en las dimensiones que comprende el problema de la contaminación del río Atoyac, que, cumpliendo con el criterio uno de Rittel y Weber (1973) confirmar que “no hay una formulación definitiva de un wicked problem”, y como refieren Cattán et al. (2012, p. 34), Velasco (2014, p. 244) y Oostra (2017), la literatura sobre problemas complejos recomienda una estrategia holística para este tipo de cuestiones.

Criterio 7 de Rittel y Weber (1973): “Cada problema perverso es esencialmente único”

Tlaxcala-Puebla y El Salto, Jalisco, tienen en común un río de los más contaminados en el país (Río Atoyac y Río Santiago, respectivamente); en ambos casos existen Organismos de la Sociedad Civil (OSC) interesados en resolver la problemática de la contaminación de los ríos.

La principal figura OSC estatal (Tlaxcala) asociada a la problemática socioambiental de la Cuenca Atoyac- Zahuapan, es el Centro Fray Julián Garcés Derechos Humanos y Desarrollo Local A.C. Surge en el año 2002 a petición de las comunidades congregadas en la Pastoral Social, ahora Pastoral de Derechos Humanos, a partir de los resultados del diagnóstico que realizaron sobre la situación de violaciones de derechos humanos en el Estado de Tlaxcala, pero no son personas de las propias comunidades (Ramírez y López (2018). Luchamos por un Atoyac con vida, La lucha contra la contaminación del río Atoyac, p. 97). El grupo Un Salto de Vida, en el Salto Jalisco, que en su página de Facebook afirman:

Somos pobladores de los municipios de El Salto y Juanacaatlán, Jalisco, que decidimos organizarnos tratando de encontrar respuestas a la depredación ambiental impuesta que sufrimos; por acción u omisión de las empresas y los gobiernos.⁶

Es decir, aunque aparentemente tienen el mismo problema y ambos tienen un OSC, en Tlaxcala el organismo tiene un origen religioso en tanto que, en el Salto, Jalisco, el organismo lo conforman pobladores de las comunidades.

Conclusiones

Se concluye que las investigaciones científicas que toman como objeto de estudio el problema de la contaminación de río Atoyac en la frontera Tlaxcala-Puebla se han llevado a cabo bajo el paradigma de la metodología convencional lineal, ello no

⁶ <https://twitter.com/unsaltodevidaac?lang=es>

obstante que Henrickson y McKelvey (2002) refieren la muerte del positivismo en la década de los años setenta (p. 7,288). No obstante, hay un reporte técnico que visualiza tal problemática desde la teoría de los *wicked problem* de Rittel y Weber (1973), situación que también se vislumbra en los resultados de María et al. (2021). Asimismo, se encontraron elementos para “comprobar” el carácter de *wicked problem* en dos de los criterios mencionados por los autores mencionados: Criterio 1 de Rittel y Weber (1973). No hay una formulación definitiva de un problema perverso; Criterio 7 de Rittel y Weber (1973): cada problema perverso es esencialmente único.

Recomendaciones

Se recomienda retomar los resultados reportados por Cattan et al. (2012) y María et al. (2021) para diseñar una estrategia holística que parta de reconocer el problema de la contaminación del río Atoyac, como un *wicked problem*; tal estrategia debe considerar la participación de todos los actores involucrados en el problema (Poder Político, Poder de la Comunidad, Poder de las Industrias, Poder del Medio Ambiente, Poder Social, Poder Científico-Tecnológico).

Referencias bibliográficas

- Aburto-Medina, A., Ortiz, I. y Hernández, E. (2017). Prevalence of Enterobacteriaceae and contaminants sur vey in sediments of the Atoyac River. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII(3), 27-37.
- Alford, J. y Head, V. W. (2017). Wicked and less wicked problems: a typology and a contingency framework. *Policy and Society*, 36(3), 397-413. <https://doi.org/10.1080/14494035.2017.1361634>
- Armas, E. P. (2019, 4 de febrero). Se reúne Marco Mena con empresarios de Pimsa para analizar posibilidades de inversión en Tlaxcala. *La Jornada de Oriente*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/se-reune->

- marco-mena-con-empresarios-de-pimsa-para-analizar-posibilidades-de-inversion-en-tlaxcala/
- Asensi, A. V. y Parra, P. A. (2002). El método científico y la nueva filosofía de la ciencia. *Anales de Documentación*, (5), 9-19.
- Bolognesi, C. Creus, A., Ostrosky-Wegman, P. y Marcos, R. (2011). Micronuclei and pesticide exposure. *Mutagenesis*, 26(1), 19-26.
- Bribiesca, L. y Merino, G. (2008). Teorías, modelos y paradigmas en la investigación científica. *Ciencia*, 2(1), 79-88.
- Cámara de Diputados (s.f.). *Proposición con punto de acuerdo sobre la planta de Pemex en San Martín Texmelucan, en el estado de Puebla y se concede el uso de la palabra, para este propósito, al Diputado Jesús Garibay García, del Partido de la Revolución Democrática*. <http://www.diputados.gob.mx/comisiones/traypres/iniclviii/inic17.htm>
- Camillus, J. C. (2008). Strategy as a wicked problem. *Harvard Business Review*, (5), 1-11.
- Casiano, F. C. y Bressers, H. (2015). Changes without changes. The Puebla's Alto Atoyac sub-basin case in Mexico. *Water Governance*, 1(2), 12-16.
- Castro-González, N. P. (2017). *Riesgo de contaminación de leche de vaca con metales pesados en los estados de Puebla y Tlaxcala, México*. [Tesis de Doctorado inédita]. Universidad de Córdoba, España.
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Moreno-Ortega, A. y Tamariz-Flores, J. V. (2017). 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*. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1386767>
- Cattan, E. (Coord.) (2012). *Regeneración de la cuenca del Río Atoyac Puebla. Reporte inicial*. Taller13 Arquitectura Regenerativa y Regenesi Group. https://issuu.com/taller13/docs/libro_atoyac_baja

- Conklin, J. (2005). *Dialogue Mapping: Building Shared Understanding of Wicked Problems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Dasgupta, P. (2021). *The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review*. HM Treasury.
- Drugus, L. (2010). What is management: a science, a discipline, an approach? Emmy as an postmodern and transdisciplinary alternative to present management. *organizacja I zarządzanie, 1(19)*, 31-39.
- Duché, G. T. T. (2020). *Diversidad edáfica y relaciones productivas de la Milpa Intercalada con Árboles Frutales en la región de Huejotzingo, Puebla*. [Tesis de Doctorado inédita]. Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, México.
- Duckett, D., Feliciano, D., Martin-Ortega, J. y Munoz-Rojas, J. (2016). Tackling wicked environmental problems: the discourse and its influence on praxis in Scotland. *Landscape and Urban Plan, 154*, 44-56. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.015>
- Escutia, M. (2020). *Chomsky, la naturaleza humana, el lenguaje y las limitaciones de la ciencia y una propuesta complementaria inspirada en C. S. Lewis*, www.unav.edu/web. <https://www.unav.edu/web/ciencia-razon-y-fe/chomsky-la-naturaleza-humana-el-lenguaje-y-las-limitaciones-de-la-ciencia>
- Fisher, W. V. (2014). *Capitalism, ecological destruction and mainstream environmental economic theory: a radical critique*. [Unpublished Doctor of Philosophy thesis]. Faculty of the University of Missouri-Kansas City.
- Flores, C. C. y de Boer, C. (2015). Symbolic implementation: Governance assessment of the water treatment plant policy in the Puebla's Alto Atoyac sub-basin, Mexico. *International Journal of Water Governance, 4(1)*, 1-24. <https://doi.org/10.7564/14-IJWG79>
- Flores, C.C., Özerol, G., Bressers, H., Kuks, S., Edelenbos, J. y Gleason, A. (2019). The state as a stimulator of wastewater treatment policy: a comparative assessment of three subnational cases in central Mexico. *Journal*

- of Environmental Policy & Planning*, 21(2), 134-152. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2019.1566060>
- Flores, C. C., Vikolainen, V. y Bressers, H., (2016). Water governance decentralization and river basin management reforms in hierarchical systems: do they work for water treatment policy in Mexico's Tlaxcala Atoyac sub-basin? *Water*, 8(210), 1-20. Doi:10.3390/w8050210
- Haber, S. H. (1993). La industrialización de México: historiografía y análisis. *Historia mexicana*, 42(3), 649-688.
- Handal, S. A., Rodríguez, L. Y., López, R. L., Carcaño, M. M., Morán, P. J. y Díaz, F. A. (2016). Water pollution Atoyac River in the watershed of Tentzo Puebla, Mexico. *Abstracts / Toxicology Letters*, 258S(2016), S62-S324.
- Handal, S. A., Rodríguez, M. Y., Carcaño-Montiel, M., López-Reyes, L., Morán, R. C. y Morán, P. J. (2015). Microbiological study of the Atoyac River located within the State Reserve Sierra del Tentzo Micro-Basin in Puebla, México. *Abstracts / Toxicology Letters*, 238S(2015), S56-S383.
- Henrickson, L. y McKelvey, B. (2002). Foundations of "new" social science: Institutional legitimacy from philosophy, complexity science, postmodernism, and agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3 Supp.), 7,288-7,295. <https://doi.org/10.1073/pnas.092079799>
- Hernandez-Ramirez, A. G., Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P. F., Mendoza-Pérez, J. A., Tabla-Hernandez, J., Escobedo-Urías, D. C., Jonathan, M. P. y Sujitha, S. B. (2019). Detection, provenance and associated environmental risks of water quality pollutants during anomaly events in River Atoyac, Central Mexico: A real-time monitoring approach. *Science of The Total Environment*, 669(1), 1,019-1,032. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.138>
- Huang, G. y London, J. K. (2016). Mapping in and out of "messes": An adaptive, participatory, and transdisciplinary

- approach to assessing cumulative environmental justice impacts. *Landscape and Urban Planning*, 154, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016>
- Ibarrarán, M. E., Saldaña-Vázquez, R. A. y Pérez-García, T. (2021). *The Cost of Pollution in the Upper Atoyac River Basin, A Systematic Review*. Instituto de Investigaciones en Medio Ambiente Xavier Gorostiaga S. J. Universidad Iberoamericana Puebla. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2103/2103.00095.pdf>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) (2020). *Workshop Report on Biodiversity and Pandemics of the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. https://ipbes.net/sites/default/files/2020-12/IPBES%20Workshop%20on%20Biodiversity%20and%20Pandemics%20Report_0.pdf
- Kaczynski, T. J. (2008). *Technological Slavery, The collected writings of Theodore J. Kaczynski*, a.k.a. “The Unabomber”, Feral House.
- Kolko, J. (2012, 7 de marzo). *An Introduction to Wicked Problems*. Austin Center for Design. <https://uxmag.com/articles/wicked-problems>
- Levin, K., Cashore, B., Bernstein, S. y Auld, G. (2007, 28 de marzo). *Playing it Forward: Path Dependency, Progressive Incrementalism, and the “Super Wicked” Problem of Global Climate Change, [Keynote speech]*. IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 6 502002. https://www.researchgate.net/profile/Graeme-Auld/publication/251880216_Playing_it_forward_Path_dependency_progressive_incrementalism_and_the_Super_Wicked_problem_of_global_climate_change/links/56f484cc08ae81582bf0a4ff/Playing-it-forward-Path-dependency-progressive-incrementalism-and-the-Super-Wicked-problem-of-global-climate-change.pdf?origin=publication_detail
- Lewis, S. (2008). The tissue issue: A wicked problem. *Jurimetrics*, 48(2), 193-215.

- López, R., Méndez-Serrano, A., Mercado, F., Oropeza, L.F. y Montero Montoya, R. (2016). Oxidative stress index in chronic exposure to volatile organic compounds and their relation with genetic polymorphisms of xenobiotic metabolism. *Abstracts / Toxicology Letters*, 259S(2016), S73-S247.
- María, R. A., Ávila, O. C. A., Luna, G. R., Hernández-Rodríguez, M. L., Lozano, M. S. A., Baquero, H. F. y Gutiérrez, O. W. (2021). Una visión holística de la problemática del río Atoyac en la frontera Puebla-Tlaxcala. En María, R. A., Ramírez, V. B. y Zagoya, M. J. (Coords.). *Ideas y experiencias sobre medio ambiente y sustentabilidad en el México neoliberal*. El Colegio de Tlaxcala, A. C. En prensa.
- Markowska, J., Szalińska, W., Dąbrowska, J. y Brząkała, M. (2019). The concept of a participatory approach to water management on a reservoir in response to wicked problems. *Journal of Environmental Management*, 259(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109626>
- Martinez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, F. P., Shruti, V. C., Sujitha, S. B., Morales-García, S. S. y Muñoz-Sevilla, N. P. (2017). Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico, multivariate approach. *Environ Earth Sci*, (1), 76-95. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6406-2>
- McLelland, C. V. (2012). *The nature of science and the scientific method*. Geological Society of America. <https://www.geosociety.org/documents/gsa/geoteachers/NatureScience.pdf>
- McNeely, J. A. (2021). Nature and COVID-19: The pandemic, the environment, and the way ahead. *Ambio*, 50(4), 767-781.
- Montero, R., Serrano, L., Araujo, A., Dávila, V., Ponce, J., Camacho, R., Morales, E. y Méndez, A. (2006). Increased cytogenetic damage in a zone in transition from agricultural to industrial use: comprehensive

- analysis of the micronucleus test in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*, 21(5), 335-342.
- Montero-Montoya, R. D., López-Vargas, R., Méndez-Serrano, A., Galicia-Alonso, I., García-Vargas, G., Serrano-García, L., Beltrán-Portugal, R., Rosado-Zaidi, S., Albores-Medina, A., Oropeza-Hernández, L., Hernández-Cadena, L., Mercado-Calderón, F., Alvarado-Toledo, E., Herrera-Morales, S. y Arellano-Aguilar, O. (2020). Increased micronucleus frequencies in reticulocytes of children exposed to industrial pollution: oxidative stress and the OGG1 S326C polymorphism. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 853(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2020.503170>
- Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Ávila, P. y Mahlkecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of The Total Environment*, 782(1), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788>
- Oostra, S. (2017). *Wicked problems ,unraveled Explaining the Dutch government's incremental approach to the United Nations Sustainable Development Goals*. [Master's thesis in International Relations, unpublished]. Radboud University, Nijmegen.
- Pérez C., G., Castañeda, R. E., García, S. W. A., Morán, P. J. L., Cruz, M. A. y Handal, S. A. (2019). Evaluation of Health Risks due to Heavy Metals in a Rural Population Exposed to Atoyac River Pollution in Puebla, Mexico. *Water*, (11), 1-14. <https://doi.org/10.3390/w11020277>
- Pérez Castresana, G., Tamariz Flores, V., López Reyes, L., Hernández Aldana, F., Castelán Vega, R., Morán Perales, J. y Handal Silva, A. (2018). Atoyac River Pollution in the Metropolitan Area of Puebla, México. *Water*, 10(3), 267. Doi:10.3390/w10030267
- Pérez C., G. Tamariz, F. V., López, R. L., Hernández, A. F., Castelán, V. R., Morán, P. J. L., García, S. W.,

- Díaz, F. A. y Handal, S. A. (2018). Atoyac River pollution Dynamics. Case Study: Emilio Portes Gil, Puebla, México. *Water*, 10, 267. <https://doi.org/10.3390/w10030267> <https://doi.org/10.20944/preprints201711.0185.v1>;Not Peer-Reviewed
- Peters, G. B. (2017). What is so wicked about wicked problems? A conceptual analysis and a research program. *Policy and Society*, 36(3), 385-396. <https://doi.org/10.1080/14494035.2017.1361633>
- Pohls F., F. L. (2021, 29 de julio). Más industrias para Tlaxcala, ¿y la salud de la población... y la procuración de justicia ambiental? *La Jornada de Oriente*. <https://www.lajornadadeoriente.com.mx/tlaxcala/mas-industrias-para-tlaxcala-y-la-salud/>
- Ramírez, V. A. y López, S. J. D. (2018). ¡Luchamos por un Atoyac con Vida! La lucha contra la contaminación del Río Atoyac y los daños a la salud que origina en el sur de Tlaxcala, México. *Bajo el Volcán*, 18(28), 95-108.
- Rittel, H. W. J. y Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4(2), 155-169.
- Rodríguez-Espinosa, P. F., Shruti, V. C., Jonathan, M. P. y Martínez-Tavera, E. (2018). Metal concentrations and their potential ecological risks in fluvial sediments of Atoyac River basin, Central Mexico: Volcanic and anthropogenic influences. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148(1), 1,020-1,033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.0>
- Rodríguez-Tapia, L. y Morales-Novelo, J. A. (2017). Bacterial pollution in rivers waters and gastrointestinal diseases. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(479), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph14050479>
- Rodríguez, R. E. (2010). *Gobernanza del saneamiento en la Cuenca Atoyac-Zahuapan del estado de Tlaxcala*. [Tesis de Maestría inédita]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA.
- Rosales, O. R. (2003). Tlaxcala, ¿un distrito industrial? *Sociológica*, 18(51), 131-163.

- Santibañez, T. B. E. (2010). *Industria y trabajadores textiles en Tlaxcala. convergencias y divergencias en los movimientos sociales, 1906–1918*. [Unpublished Doctor of Philosophy thesis]. Universidad de Leiden, Holanda.
- Science buddies (2021, August). Steps of the Scientific Method. <https://www.sciencebuddies.org>. <https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/science-fair/steps-of-the-scientific-method>
- Shepard, P. (1998). *Nature and Madness*. Published by the University of Georgia Press.
- Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodríguez-Espinosa, P. F. y Rodríguez-González, F. (2019). Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico. *Science of The Total Environment*, 654(1), 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.054>
- Shruti, V. C., Rodríguez-Espinosa, P. F., Martínez-Tavera, E. y Hernández-Gonzalez, D. (2018). Metal concentrations in recent ash fall of Popocatepetl volcano 2016, Central Mexico: Is human health at risk? *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162(1), 324-333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.067>
- Shruti, V. C., Jonathan, M. P., Rodríguez-Espinoza, P. F., Nagarajan, R., Escobedo-Urias, D. C., Morales-García, S. S. y Martínez-Tavera, E. (2017). Geochemical characteristics of stream sediments from an urban-volcanic zone, Central Mexico, Natural and man-made inputs. *Chemie der Erde*, 25,433, (1), 1-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2017.04.005>
- Soto, M. de O. G. y Ramírez-Fuentes, A. (2017). The Economic Benefits of The Atoyac Basin's Restoration in Puebla, Mexico. *Espacialidades, Revista de temas contemporáneos sobre lugares, política y cultura*, 7(1), 66-98.
- Tabla-Hernandez, J., Hernández-Ramírez, A. G., Martínez-Tavera, E., Rodríguez-Espinosa, P. F. y Mangas-Ramírez, E. (2020). Impacts on water quality by in

- situ induced ozone-oxygen oxidation in a polluted urban reservoir. *Science of the Total Environment*, 735(2020), 139,364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139364>
- The, S. & Blomqvist, A. (2017). *The Atoyac River A study about its problems and possible future solutions from a sustainable perspective*. [Degree Project in Technology]. KTH Royal Institute of Technology, School of Architecture and the Built Environment, Stockholm, Sweden.
- Un Salto de Vida A. C. (s.f.). *Inicio*. <https://www.facebook.com/unsaltodevida/about>
- Valerdi, G.M.A. (2005). *El tiempo libre en condiciones de flexibilidad del trabajo: caso Tetla Tlaxcala*. [Tesis de Doctorado inédita]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
- _____ (2008). Asentamientos industriales en Tlaxcala: una explicación desde la teoría de la regulación. *Bajo el Volcán*, 7(13), 177-196.
- Valdiviezo, S. R. (2009). *Poder y Región en Tlaxcala. 1975-1987*. [Tesis de Doctorado inédita]. Universidad Iberoamericana. México.
- Varpio, L., Aschenbrener, C. y Bates, J. (2017). Tackling wicked problems: how theories of agency can provide new insights. *Medical Education*, 51(4), 353-365. <https://doi.org/10.1111/medu.13160>
- Velasco, S. P. (2014). *Antropología socioambiental. Ecología política, sujetos rurales y transformación del río Atoyac en el municipio de Nativitas, Tlaxcala*. [Tesis de Doctorado inédita]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Velthuisen, A. (2012). A transdisciplinary approach to understanding the causes of wicked problems such as the violent conflict in Rwanda. *Td The Journal for Transdisciplinary Research in Southern Africa*, 8(1), 51-62.
- Vitasek, K. (2014). Churchman, Rittel and Webber: The “Wicked” Problem. *Future of Sourcing Digital*.

<https://futureofsourcing.com>. <https://futureofsourcing.com/churchman-rittel-and-webber-the-%E2%80%9Cwicked%E2%80%9D-problem>

United Nations Environment Programme (UNEP) (2021). *Making peace with nature. A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies*. <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/34948/MPN.pdf>

Zerzan, J. (2015). Faster: the age of acceleration. *Black and green review*, (1), 6.

La edición de esta obra estuvo a cargo de Arturo Juárez Martínez,
Mary Carmen Paredes Díaz y Rafael Cruz Sánchez.

Se terminó de reimprimir en mayo 2022, en los talleres de:
TRES DISEÑO, 13 Poniente 502 - B. Col. Centro Histórico
C.P. 72000 Puebla, Puebla, México.
Tel.: 01 (222) 242 0267

Impreso en papel bond ahuesado de 75 grs. Impresión offset.
Se emplearon tipos Times New Roman 11, 12, 13 15 y 25 puntos.

Tiraje de 250 ejemplares.

Mayo
2022



ISBN: 978-607-7673-75-0



9 786077 673750

