

Sandoval Villasana, Ana María; Pulido-Flores, Griselda; Monks, Scott; Gordillo
Martínez, Alberto José; Villegas Villarreal, Elba Cristina

**EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA DE LA
DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO ATOYAC, MÉXICO**

Interciencia, Vol. 34, Núm. 12, diciembre-sin mes, 2009, pp. 880-887

Asociación Interciencia
Venezuela

Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=33913151007>



Interciencia

ISSN (Versión impresa): 0378-1844

interciencia@ivic.ve

Asociación Interciencia

Venezuela

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA Y TOXICOLÓGICA DE LA DEGRADACIÓN AMBIENTAL DEL RÍO ATOYAC, MÉXICO

Ana María Sandoval Villasana, Griselda Pulido-Flores, Scott Monks, Alberto José Gordillo Martínez y Elba Cristina Villegas Villareal

RESUMEN

Desde 1995 se ha registrado un alto grado de deterioro en el río Atoyac, México, debido a los asentamientos humanos e industriales. El objetivo de este estudio fue evaluar la condición actual del río y establecer la relación entre los parámetros de la legislación vigente y las pruebas de toxicidad y mutagenicidad. Se determinaron parámetros de campo (color, olor, temperatura, CE, pH, OD), físicoquímicos (SST, SDT, SSE, DBO₅, DQO y GyA, N_{total}, N_{org}, P_{total}, P_{org}, ortofosfatos), metales pesados (As, Cd, Cu, Cr, Cr⁺⁶, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe, Mn), microbiológicos (coliformes fecales) con base en los límites máximos permisibles (LMP) en la NOM-001-ECOL-1996 y en los CE-CCA-001/89, análisis de toxicidad (*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*) y mutagenicidad (prueba de Ames con microsomas/Sal-

monella typhimurium), en época de sequía en nueve estaciones a lo largo de 85km. Los valores para OD, DBO₅ y DQO fueron de 2-6, 11-270 y 22-1841mg-l⁻¹, respectivamente. Los metales fueron detectados por debajo de los LMP en todas las estaciones, excepto en la estación 5 (0,002mg-l⁻¹ de Hg) y la 8 (0,13mg-l⁻¹ de Cr⁺⁶). Los coliformes fecales rebasaron los LMP en todas las estaciones. Los valores para *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* y se encuentran en 2-28 y 1-4UT, y para la prueba de Ames entre 5 y 63RM, indicando toxicidad y mutagenicidad desde la estación 3 a la 9. Se registró contaminación alta según la legislación vigente y un riesgo para la salud pública de acuerdo a los parámetros toxicológicos y mutagénicos.

Introducción

La problemática ambiental del río Atoyac es el resultado del deterioro producido por la expansión demográfica sostenida y el desarrollo económico de los estados de Puebla y Tlaxcala, que se asientan en 2429km² de extensión superficial de la subcuenca del Atoyac (Figura 1). Las actividades socioeconómicas de la zona son: alimenticia, textil, química, petroquímica, automotriz, papelería, bebidas, hierro y acero, farmacéutica, tenería,

metalmecánica, siderúrgica y producción agrícola (INEGI, 2004). Estas actividades producen aproximadamente 55 descargas de aguas residuales directas e indirectas, 45 industriales y 10 municipales (CONAGUA, 2007b).

Antecedentes

En los últimos 14 años, diferentes estudios han caracterizado la calidad del agua del río Atoyac y de las zonas de impacto a su alrededor, determinando las condiciones y el

riesgo que presentan las descargas depositadas en él. En 1995, Méndez *et al.*, reportó que la incorporación del agua residual procedente de Tlaxcala, San Martín Texmelucan, Moyotzingo y la Ciudad de Puebla al río provocó el incremento del contenido de sales solubles, metales pesados, detergentes y grasas en la zona. Posteriormente, Méndez *et al.* (2000) muestrearon suelos sometidos a riego por más de 30 años con aguas del río, revelando que el agua presentaba concentra-

ciones de metales en el orden Fe>Pb>Mn>Cr>Cd, detectándolos en el suelo analizado. Silva *et al.* (2002) analizaron la calidad del agua de la región atlixquense, que incluye el río Nexapa, afluente del Atoyac, mostrando que se excedieron LMP para parámetros como DBO₅, DQO, dureza, temperatura, nitrógeno amoniacal, pH, SS, turbiedad, Pb, Cr, Cd y Zn. Saldaña *et al.*, (2002a), empleando pruebas de toxicidad en la evaluación de la calidad del agua del río Alse seca, que

PALABRAS CLAVE / Calidad del Agua / Metales Pesados / Río Atoyac / Toxicidad /

Recibido: 08/04/2009. Modificado: 05/11/2009. Aceptado: 12/11/2009.

Ana María Sandoval Villasana. Licenciada en Química, Farmacéutica Bióloga y Maestría en Microbiología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Estudiante de doctorado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH). Investigadora, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México. Dirección: Paseo Cuauhnáhuac Núm. 8532. Col. Progreso, Jiutepec, Morelos. C.P. 62550. e-mail: amsandov@tlaloc.ima.mx

Griselda Pulido-Flores. Licenciatura y Maestría en Ciencias en Biología, UNAM, México. Doctorado en Ciencias en Ecología y Desarrollo Sustentable, El Colegio de la Frontera Sur, México. Investigadora, UAEH, México. e-mail: gpulido@uaeh.edu.mx

Scott Monks. Licenciatura en Ciencias de la Educación, Missouri Western State University, EEUU. Maestría en Ciencias, University of Nebraska-Lincoln, EEUU. Ph.D. University of Toronto, Canadá. Investiga-

dor, UAEH, México. e-mail: smonks@uaeh.edu.mx

Alberto José Gordillo Martínez. Ingeniero Químico Industrial, Instituto Politécnico Nacional, México. Doctorado en Ciencias Químicas, Universidad Politécnica de Madrid, España. Investigador, UAEH, México. e-mail: gordillo@uaeh.edu.mx

Elba Cristina Villegas Villareal. Licenciada en Ingeniería de Alimentos, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México. Maestría en Ingeniería Química, Universidad Autóno-

ma Metropolitana de Iztapalapa, México. Ph.D. en Ciencias Animales, Oklahoma State University, EEUU. Investigadora. Centro de Investigación en Biotecnología. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México. Dirección: Av. Universidad 1001. Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos. C.P. 62209. e-mail: elbav@buzon.uaem.mx

PHYSICOCHEMICAL, MICROBIOLOGICAL AND TOXICOLOGICAL EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF THE ATOYAC RIVER, MEXICO

Ana María Sandoval Villasana, Griselda Pulido-Flores, Scott Monks, Alberto José Gordillo Martínez and Elba Cristina Villegas Villareal

SUMMARY

A high degree of deterioration has been registered in the Atoyac river, Mexico, since 1995, due to local residences and industrial development. The aim of this study was to evaluate current environmental conditions at nine stations during the drought season along 85km of the river and to establish the relationship between current legislation parameters and toxicity and mutagenicity tests. Environmental quality was quantified using field observations (color, odor, temperature, CE, pH, and DO), physicochemical (SST, SDT, SSE, DBO₅, DQO, GyA, N_{total}, N_{org}, P_{total}, P_{org} and orthophosphates), heavy metals (As, Cd, Cu, Cr, Cr⁺⁶, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe y Mn), microbiological (fecal coliforms) by comparison with the maximum permissible level (MPL) NOM-001-ECOL-1996 and CE-CCA-001/89, and toxicity

(*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*) and mutagenicity (Salmonella/microsome, or Ames test) analysis. Values for DO, DBO₅ and DQO were 2-6, 11-270 and 22-1841mg·l⁻¹, respectively. Concentrations of heavy metals were below the MPL except at stations 5 (0.002mg·l⁻¹ Hg) and 8 (0.13mg·l⁻¹ Cr⁺⁶). Fecal coliform bacteria were above the MPL at all stations. Values for *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* and the Ames test were 2-28 UT, 1-4 UT and 5-63 RM, respectively, which indicated toxicity and mutagenicity from stations 3 to 9. The high level of contamination in this zone indicates that it is necessary to evaluate adherence to approved standards and to modify the existing regulations in order to include additional contamination parameters.

AVALIAÇÃO FÍSICOQUÍMICA, MICROBIOLÓGICA E TOXICOLÓGICA DA DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DO RIO ATOYAC, MÉXICO

Ana María Sandoval Villasana, Griselda Pulido-Flores, Scott Monks, Alberto José Gordillo Martínez e Elba Cristina Villegas Villareal

RESUMO

Desde 1995 tem sido registrado um alto grau de deterioração no rio Atoyac, México, devido aos assentamentos humanos e industriais. O objetivo deste estudo foi avaliar a condição atual do rio e estabelecer a relação entre os parâmetros da legislação vigente e as provas de toxicidade e mutagenicidade. Determinaram-se parâmetros de campo (cor, odor, temperatura, CE, pH, OD), físicoquímicos (SST, SDT, SSE, DBO₅, DQO e GyA, Ntotal, Norg, Ptotal, Porg, ortofosfatos), metais pesados (As, Cd, Cu, Cr, Cr⁺⁶, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe, Mn), microbiológicos (coliformes fecais) baseados nos limites máximos permitíveis (LMP) na NOM-001-ECOL-1996 e nos CE-CCA-001/89, análises de toxicidade (*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*) e mutagenicidade

(prova de Ames com microssomas/*Salmonella typhimurium*), em época de seca em nove estações ao longo de 85km. Os valores para OD, DBO₅ e DQO foram de 2-6, 11-270 e 22-1841mg·l⁻¹, respectivamente. Os metais foram detectados por baixo dos LMP em todas as estações, exceto na estação 5 (0,002mg·l⁻¹ de Hg) e a 8 (0,13mg·l⁻¹ de Cr⁺⁶). Os coliformes fecais ultrapassaram os LMP em todas as estações. Os valores para *Vibrio fischeri*, *Daphnia magna* e se encontram em 2-28 e 1-4UT, e para a prova de Ames entre 5 e 63RM, indicando toxicidade e mutagenicidade desde a estação 3 a 9. Registrou-se contaminação alta segundo a legislação vigente e um risco para a saúde pública pelos parâmetros toxicológicos e mutagênicos.

al igual que el Atoyac desemboca en la presa Manuel Ávila Camacho, encontraron un coeficiente de correlación alto entre parámetros físicoquímicos y toxicológicos. Saldaña *et al.* (2002b) reportaron 522 descargas municipales e industriales en Estado de Puebla, que en su mayoría cumplió con los parámetros de la NOM-001-ECOL-1996 y resaltaron la importancia de incluir en la norma las pruebas de toxicidad con *Photobacterium phosphoreum* para evaluar sustancias tóxicas no detectadas por los análisis convencionales. En el estudio de viabilidad de uso acuícola de *Ciprinus carpio* en la Presa Manuel Ávila Camacho, Flores *et al.* (2004) demostraron que la concentración de

metales pesados en el agua de la presa Valsequillo no rebasó el LMP para su uso en riego de cultivos, además de la ausencia de elementos tóxicos en el músculo de peces. Sin embargo, el grado de contaminación en el embalse de la presa lo hace no apto para consumo humano. Mangas *et al.* (2005) resaltaron la gravedad en que se encuentra la presa Valsequillo y discuten diversos intentos para rehabilitarla, cuyos logros han quedado al margen de las metas propuestas. Saldaña y Gómez (2006) incluyeron en su estudio un parámetro de toxicidad (*Vibrio fischeri*), señalando que 17 de las 23 descargas analizadas no cumplen con la norma y 16 de ellas presentan toxicidad de 2-1165

unidades de toxicidad (UT); sin embargo, los parámetros de toxicidad no están incluidos en la norma mexicana. CONAGUA (2007a) reportó que las aguas residuales de los ríos Atoyac y Zahuapan rebasaron en 2005 los LMP de DBO₅, DQO, metales y toxicológicos, proponiendo un acuerdo para el saneamiento de la presa Valsequillo con metas en tres etapas. Sin embargo, el nivel de contaminación en la presa sigue siendo alto, lo que demuestra la necesidad de disminuir el impacto de las descargas. Esto motivó la realización del presente estudio para determinar el deterioro actual del río Atoyac y establecer la relación entre los parámetros establecidos en la legislación

vigente y las pruebas de toxicidad y mutagenicidad.

Área de Estudio

El río Atoyac es una subcuenca de la cuenca del Balsas, ubicada en la región hidrológica número 18 (Figura 1), que desemboca en el Océano Pacífico (INEGI, 2008). Se seleccionaron nueve sitios de muestreo, ubicando las estaciones en los puntos de confluencia de los afluentes y el río, así como en los sitios donde las industrias descargan sus aguas residuales en el río (Tabla I). Los tipos de descargas industriales y municipales, colectores, plantas de tratamiento en cada una de las estaciones de muestreo, así



Figura 1. Ubicación de la subcuenca del río Atoyac (modificado de INEGI, 2004). El río Atoyac desde San Jerónimo de Lázaro Cárdenas en Tlaxcala, recorre 31 municipios hacia el sur hasta Puebla, Pue., desembocando en la presa Valsequillo.

como los afluentes y efluentes, se muestran en la Figura 2. Las estaciones son 1) la Exhacienda de Guadalupe, 2) Chiautla de Arenas, 3) Villa Alta, 4) San José Atoyatenco, 5) Puente río Atoyac, 6) San Lorenzo, 7) Puente México, 8) Presa Valsequillo (Sur) y 9) Presa Valsequillo (cortina).

Métodos

Recolección de muestras

En el 2007, en época de estiaje, se tomaron muestras simples en un día normal de operación industrial para determinar cuantitativa y cualitativamente la contaminación

producida. Las muestras se tomaron utilizando a) envases limpios y secos de plástico de 2 litros para análisis físico-químicos, b) envases de vidrio color ámbar de 500ml para metales pesados, c) envases de vidrio color ámbar de 1 litro para análisis de toxicidad (llenándose a contracorriente en el río), d) bolsas estériles de 100ml para el análisis microbiológico (se abrió la bolsa dentro del agua y se selló *in situ*). Los parámetros de campo se obtuvieron empleando un equipo multiparámetros YSI 556MPS. El caudal del río se midió con un molinete, en forma simultánea con la toma de muestras. El manejo y la

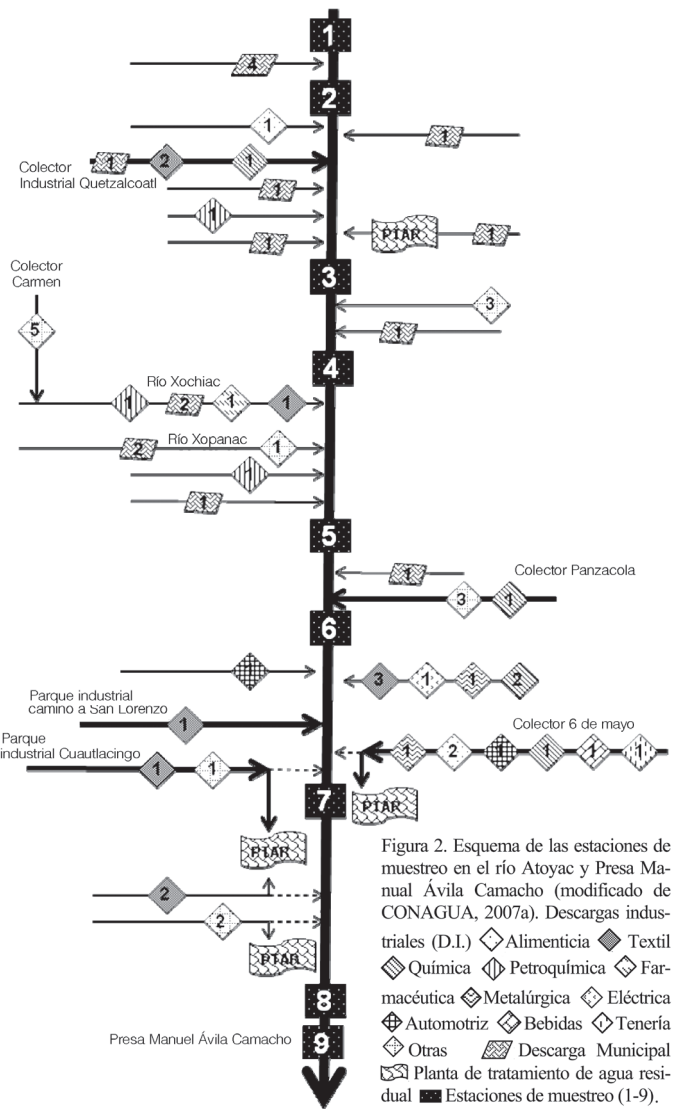


Figura 2. Esquema de las estaciones de muestreo en el río Atoyac y Presa Manuel Ávila Camacho (modificado de CONAGUA, 2007a). Descargas industriales (D.I.) \diamond Alimenticia \blacklozenge Textil \blacklozenge Química \blacklozenge Petroquímica \blacklozenge Farmacéutica \blacklozenge Metalúrgica \blacklozenge Eléctrica \blacklozenge Automotriz \blacklozenge Bebidas \blacklozenge Tenería \blacklozenge Otras \blacklozenge Descarga Municipal \blacklozenge Planta de tratamiento de agua residual \blacklozenge Estaciones de muestreo (1-9).

TABLA I
ESTACIONES DE MONITOREO

Estación	Sitio de muestreo	Altitud (msnm)	Latitud norte	Longitud oeste
1	Exhacienda de Guadalupe	2381	19°22'02,10"	98°30'56,50"
2	Chiautla de Arenas	2277	19°19'02,30"	98°27'30,90"
3	Villa Alta	2227	19°17'16,30"	98°23'02,30"
4	San José Atoyatenco (Puente)	2213	19°14'25,20"	98°21'35,90"
5	Puente río Atoyac (Loc. El Valor)	2178	19°09'27,66"	98°14'30,48"
6	San Lorenzo (Puente)	2182	19°09'22,70"	98°14'13,00"
7	Puente México (Autopista)	2114	19°04'10,86"	98°14'27,30"
8	Presa Valsequillo (Sur)	2070	18°57'57,78"	98°16'39,24"
9	Presa Valsequillo (Cortina)	ND	18°54'42,48"	98°06'38,54"

ND: no determinada.

preservación de las muestras se realizaron con base en la NMX-AA-003-1980.

Parámetros determinados

Los parámetros estudiados se agruparon en cinco categorías: 1) De campo, tales como caudal, materia flotante, color, olor, temperatura, CE, pH y OD; 2) Físico-químicos: 2A. sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT), sólidos sedimentables (SSe), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), grasas y aceites (GyA);

2B. nutrientes: nitrógeno total (N_{Total}), nitrógeno amoniacal ($N_{amoniacal}$), nitrógeno orgánico (N_{org}), nitrógeno como nitritos y nitratos ($N_{nitritos} + N_{nitratos}$), nitrógeno nitritos ($N_{nitritos}$), fósforo total (P_{total}), fósforo orgánico (P_{org}) y ortofosfatos (P_{orto}); 3) Metales pesados (As, Cd, Cu, Cr, Cr^{+6} , Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Fe y Mn); 4) Microbiológicos (coliformes fecales) y 5) Toxicidad (*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*) y Mutagenicidad (prueba de Ames) con dos cepas (TA98 y TA100), sin y con activación metabólica (-S9 y +S9). En las cuatro primeras categorías, para determinar la calidad del agua del río se tomó como referencia los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la NOM-001-ECOL-1996; así como los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-

CCA-001/89) y La Ley Federal de Derechos de Agua (LFA, 2007). Los análisis de toxicidad y mutagenicidad se realizaron de acuerdo a las normas mexicanas (NMX-AA-112-1995-SCFI) y (NMX-AA-087-1995-SCFI) y a la (OECD-471, 1995).

Resultados

Parámetros de campo

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla II. La estación con el máximo caudal es la 8 (5686 l·s⁻¹), mientras que la estación 1 presenta el caudal más bajo (273 l·s⁻¹). La materia flotante, presente sólo en la estación 4, fue de tipo doméstico (botellas PET, plásticos y latas); la norma NOM-001-ECOL-1996 establece ausencia de materia flotante. En el color son evidentes los cambios a lo largo de los nueve sitios, iniciando con un color café en las estaciones 1 y 2, transformándose en azul en la estación 3, negro en las estaciones 4 a 8 para, finalmente terminar en gris en la estación 9. Las estaciones 1, 2 y 3 no presentan olor alguno, mientras que de la 4 a la 9 mostraron un olor a ácido sulfhídrico. La temperatura en el agua del río osciló entre 14 y 19°C entre las estaciones 1 y 9; los CE-CCA-001/89 establecen condiciones naturales de temperatura de más de 1,5°C. Los valores mínimos de conductividad eléctrica se presentaron en las estaciones 1 y 2 (213 y 250 μS·cm⁻²), y el valor máximo se registró en la estación 8 (945 μS·cm⁻²). Los pH de 8 estaciones son similares (7-7,5), excepto la estación 3 con un pH de 8. Para los parámetros de color, olor, CE y pH no se han establecido LMP en la NOM-001-ECOL-1996 ni en los CE-CCA-001/89. La concentración máxima de OD se registró en la estación 2 (8,6 mg·l⁻¹), seguida por las estaciones 1, 7 y 6 (6,4; 6,1 y 5,9 mg·l⁻¹) y el valor mínimo (1,7 mg·l⁻¹) se localizó en la es-

TABLA II
PARÁMETROS DE CAMPO

Estación	Caudal (l·s ⁻¹)	MF	Color	Olor	T (°C)	CE (μS·cm ⁻²)	pH	OD (mg·l ⁻¹)	LMP NOM-001-ECOL-1996	LMP CE-CCA-001/89
1	273	No	Café	No	15	213	7,4	6,4	Temperatura= URA, UPU, PVA= 40°C	Temperatura= condic. naturales + 1,5°C.
2	704	No	Café	No	14	250	7,7	8,6		
3	1228	No	Azul	No	14	570	8,0	3,3		
4	1872	SI	Negro	Si (H ₂ S)	14	610	7,3	2,0	Materia flotante (MF) URA, UPU, PVA=ausente	Materia flotante= desagradable a la vista OD= 5mg·l ⁻¹
5	2208	No	Negro	Si (H ₂ S)	16	692	7,5	2,6		
6	4271	No	Negro	Si (H ₂ S)	18	905	7,6	5,9		
7	3883	No	Negro	Si (H ₂ S)	16	912	7,6	6,1		
8	5686	No	Negro	Si (H ₂ S)	16	945	7,5	5,1		
9	NR	No	Gris	Si (H ₂ S)	19	769	7,0	1,7		

LMP: límite máximo permisible, URA: uso riego agrícola, UPU: uso público urbano, PVA: protección vida acuática, NR: no realizado.

tación 9, encontrándose fuera de los CE-CCA-001/89.

Parámetros fisicoquímicos

En la Tabla III se muestran los valores de los parámetros SST, SDT, SSe, DBO₅, DQO

(270 mg·l⁻¹), siendo rebasado el LMP para URA en las estaciones 5 y 9; para UPU en las estaciones 5, 6 y 7; y para PVA en las estaciones 3 a la 9. El valor mínimo de DQO (22 mg·l⁻¹) se observó en la estación 1 y el máximo

de 15400 en las estaciones 1 y 8, respectivamente; sólo la estación 1 cumple con el LMP establecido en los CE-CCA-001/89. Los LMP para N_{org} y para N_{nitritos}+N_{nitros} no se contemplan en la legislación actual. El valor para

TABLA III
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS TRADICIONALES

Estación	SST mg·l ⁻¹	SDT mg·l ⁻¹	SSe ml·l ⁻¹	DBO ₅ mg·l ⁻¹	DQO mg·l ⁻¹	Grasas/ aceites mg·l ⁻¹	LMP NOM-001-ECOL-1996	LMP CE-CCA-001/89	LMP LFD-2008
1	64	<0,18	0,6	11	22	ND	SST, URA, UPU, PVA= 200, 125, 60mg·l ⁻¹	Grasas y aceites= ausentes	DQO= 100mg·l ⁻¹
2	70	<0,18	0,0	23	36	ND			
3	109	<0,18	0,0	87	189	15	Sse, URA, UPU, PVA= 2ml·l ⁻¹		
4	80	<0,18	0,7	88	157	24			
5	110	<0,18	0,6	259	357	26	DBO, URA, UPU, PVA= 200, 150 y 60mg·l ⁻¹		
6	172	<0,18	0,7	157	314	22			
7	343	11	2	270	383	24	Grasas y aceites RA, UPU, PVA= 25mg·l ⁻¹		
8	240	<0,18	1	87	200	26			
9	240	<0,18	1	78	1841	NR			

ND: no detectado, NR: no realizado.

y GyA. El valor mínimo de SST se obtuvo en la estación 1 (8 mg·l⁻¹) y el máximo en la estación 7 (343 mg·l⁻¹). El LMP de SST para Uso de Riego Agrícola (URA) es rebasado en las estaciones 7, 8 y 9. En las estaciones 6 a 9 se sobrepasa el LMP para Uso Público Urbano (UPU), mientras que para Protección de Vida Acuática (PVA) el LMP es excedido en todas las estaciones. Solamente se registró SDT (11 mg·l⁻¹), parámetro que no se incluye en la normativa vigente, en la estación 7. Para SSe todas las estaciones cumplen con los LMP establecidos para URA, UPU y PVA. Las concentraciones mínima y máxima de DBO₅ se registraron en las estaciones 1 y 7 (11 y

(1841 mg·l⁻¹) en la estación 9, siendo rebasado el LMP establecido en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua en las estaciones 3 a 9. El dato mínimo para GyA (15 mg·l⁻¹) fue en la estación 3 y el máximo (26 mg·l⁻¹) en las estaciones 5 y 8. Estas dos últimas estaciones no cumplen con el LMP establecido en la NOM-001-ECOL-1996. En la Tabla IV se muestran los valores obtenidos para N y P en sus diferentes formas. La concentración mínima de N_{total} detectada en las estaciones 1 y 8 fue de 2471 mg·l⁻¹ y la máxima de 26551 mg·l⁻¹; ninguna de las estaciones cumple con los LMP para URA, UPU y PVA. El valor mínimo de N_{amoniaco} registrado fue de 0,5 mg·l⁻¹ y el máximo

N_{nitros} en todas las estaciones está dentro del LMP de los CE-CCA-001/89. En cuanto al P_{total} el valor mínimo y el máximo, de 1,0 y 6,0 mg·l⁻¹ en las estaciones 2 y 8, cumplen con el LMP establecido en la NOM-001-ECOL-1996. Por otro lado, ninguna estación cumple con el LMP que marcan los CE-CCA-001/89. Se cuantificaron fosfatos orgánicos y ortofosfatos en todas las estaciones, aunque estos compuestos no se encuentran regulados por ninguna norma.

Metales

En la Tabla V se muestran los metales cuantificados. Los valores de As y Cd se encuentran dentro

TABLA IV
PARÁMETROS RELACIONADOS CON MATERIA ORGÁNICA

Estación	N total	N amoniacal	N org	N-nitritos +N-nitratos	N-nitritos	P total	P org	P orto	LMP	LMP
									NOM-001-ECOL-1996 mg·l ⁻¹	CE-CCA-001/89 mg·l ⁻¹
1	2471	0,5	1	1	0,09	1	0,3	0,3	N _{total} URA, UPU, PVA= 60, 60, 25	N _{amoniacal} = 0,6
2	4223	0,9	1738	1	0,07	1	0,0	0,3		
3	15772	6952	8448	0,4	0,02	2	0,4	1,2		
4	1686	9746	6864	1,3	0,03	2	0,2	1,4	P _{total} URA, UPU, PVA= 30, 30, 10	Nitritos= 0,6
5	16531	5654	10296	0,6	0,02	4	0,2	2,2		
6	14480	8118	5962	0,4	0,02	3	0,8	2,0		
7	22420	11990	9900	0,5	0,03	5	0,5	2,9	P _{total} URA, UPU, PVA= 30, 30, 10	P _{total} = 0,05
8	26551	15400	10670	0,5	0,02	6	0,9	1,5		
9	11660	9339	2321	NR	0,02	2	0,06	NR		

NR: no realizado.

del LMP de la NOM-001-ECOL-1996. Se detectó Cr⁺⁶ en la estación 8 con una concentración 0,13mg·l⁻¹, rebasando significativamente el LMP establecido en los CE-CCA-001/89. La existencia de Hg en todas las estaciones muestra concentraciones de 0,001mg·l⁻¹ y cumple con la NOM-001-ECOL-1996, excepto en la estación 5 (0,002mg·l⁻¹) que rebasa el LMP de los CE-CCA-001/89. El Ni en to-

das las estaciones muestra concentraciones por debajo de la NOM-001-ECOL-1996 y no se le considera en los CE-CCA-001/89. El Fe y el Mn no se detectaron de la estación 1 a la 7, pero el Fe está presente en las estaciones 8 y 9 (0,53 y 0,51mg·l⁻¹), mientras que el Mn solo se detectó en la estación 9 (0,52mg·l⁻¹); para ninguno de ellos hay LMP en la NOM-001-ECOL-1996 ni en los CE-CCA-001/89.

Las concentraciones de Cu, Cr_{total}, Pb, Zn y Al detectadas estuvieron debajo del LMP de la NOM-001-ECOL-1996 en todas las estaciones.

Microbiológicos

El valor mínimo y el máximo de coliformes fecales se registraron en las estaciones 2 y 7 (2,20E3 y 3,08E07NMP/100ml). Ninguna de las estaciones cumple con

el LMP establecido en la NOM-001-ECOL-1996 (Tabla VI).

Toxicológicos

Para evaluar los resultados de toxicidad con *V. fischeri* y *D. magna* (Tabla VI) se empleó la clasificación de toxicidad de acuerdo con Bulich (1982) y para la prueba de Ames los valores de razón de mutagenicidad (RM; Mortenmals, 2000). En las estaciones 1 y 2 no se detectó toxicidad con *V. fischeri*; en las estaciones 3 y 4 existe toxicidad con 3 y 2 unidades de toxicidad (UT), de las estaciones 5 a la 9 se registró niveles muy tóxicos (28-18UT) debido a la presencia de compuestos orgánicos. La estación 3 se mostró levemente tóxica con *D. magna* (1UT) y las estaciones 4 a 9 resultaron tóxicas (2-4UT), debido probablemente a la presencia de compuestos inorgánicos del tipo metales y metaloides.

TABLA V
METALES PESADOS Y METALOIDES

Estación	As	Cd	Cu	Cr	Cr ⁺⁶	Hg	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Mn	LMP	LMP
													NOM-001-ECOL-1996 mg·l ⁻¹	CE-CCA-001/89 mg·l ⁻¹
1	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	0,002	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	As URA, UPU, PVA= 0,2; 0,1; 0,1	As III= 0,2
2	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	0,001	0,017	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Cd URA, UPU, PVA= 0,2; 0,1; 0,1	
3	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	0,001	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Cu URA, UPU, PVA= 4,0; 4,0; 4,0	Cn= 0,005
4	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	0,001	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Cr URA, UPU, PVA= 1,0; 0,5; 0,5	
5	<0,005	0,04	<0,05	<0,05	ND	0,002	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Hg URA, UPU, PVA=0,01; 0,005; 0,005	Cr ⁺⁶ = 0,01
6	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	0,001	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Ni URA, UPU, PVA= 0,5; 0,2; 0,2	
7	0,01	0,05	<0,05	<0,05	ND	0,001	0,017	<0,10	<0,1	<5,0	ND	ND	Pb URA, UPU, PVA= 0,2; 0,1; 0,1	Hg= 0,001
8	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	0,13	<0,0005	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	0,53	ND	Zn URA, UPU, PVA= 10,0; 10,0; 10,0	
9	<0,005	<0,02	<0,05	<0,05	ND	<0,0005	<0,05	<0,10	<0,1	<5,0	0,51	0,52		

ND: no detectado.

TABLA VI
PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS, TOXICOLÓGICOS Y MUTAGÉNICOS

Estación	Coliformes fecales NMP/100ml	<i>Vibrio fischeri</i> CE ₅₀ (%)		<i>Daphnia magna</i> CE ₅₀ (%)		CEPA TA98		CEPA TA100		LMP (NOM-001-ECOL-1996)	Clasif. de toxicidad (Bulich, 1982)
		UT	UT	UT	UT	-S9	+S9	-S9	+S9		
1	2,64E03	TND	TND	TND	TND	-	-	-	-	Coliformes fecales URA= 1000NMP/100ml	>4 Muy tóxica
2	2,20E03	TND	TND	TND	TND	-	-	-	-		2-4 Tóxica
3	2,64E06	33	3	82	1	6	-	-	-		1.33-1,99 Moderadamente tox.
4	2,64E06	40	2	53	2	5	-	-	-		<1,33 Levemente tóxica
5	2,53E06	4	28	57	2	7	-	-	-		Clasif. de mutagenicidad (Mortenmals y Zeiger, 2000)
6	2,64E06	17	6	63	2	63	-	-	-	LMP (CE-CCA-001/89)	
7	3,08E07	18	6	52	2	-	-	5	-		<2= negativo
8	2,53E06	5	19	24	4	13	5	7	-	Colif. fec. <200NMP/100ml	>2= positivo
9	2,64E07	6	18	32	3	14	5	6	-		

TND: toxicidad no detectada, -: negativo.

Prueba de Ames. En las estaciones 1, 2 y 7 no se detectó mutagenicidad (ND) con la cepa TA98 sin activación metabólica, pero sí en las estaciones 3, 4, 5, 6, 8 y 9 con valores de 6, 5, 7, 63, 13 y 14RM respectivamente, siendo significativamente más alta la estación 6. Con la cepa TA98 con activación metabólica no se registró mutagenicidad en las estaciones 1 a 7, pero sí se registró en las estaciones 8 y 9 con valores de 5RM (Tabla VI). Empleando la cepa TA100 sin activación metabólica, en las estaciones 1 a 6 no se detectó mutagenicidad, pero las estaciones 7, 8 y 9 presentan valores mutagénicos de 5, 7 y 6RM. Empleando la misma cepa con activación metabólica no se detectó mutagenicidad en ninguna de las estaciones (Tabla VI).

Discusión

El caudal del río Atoyac se incrementa desde la primera medición en la estación 1 hasta la estación 6 en 15 veces, de 273 a 42711 s^{-1} , disminuyendo en la estación 7 a 38831 s^{-1} . En esta estación hay dos parques industriales y un colector industrial, además de 18 diferentes tipos de industrias, lo cual conlleva extracción de agua del río para sus procesos (Figura 2 y Tabla II). El cambio de color en las estaciones 1 y 2 fue influenciado por la fuerza de la corriente, que arrastra partículas suspendidas que modifican el color natural; en la estación 3 el cambio se debe a la descarga textilera del teñido de telas, específicamente mezclilla. Los cambios subsecuentes se deben a las descargas de industrias procesadoras de alimentos, metalúrgicas, químicas y de colectores industriales, que imparten al agua un color negro de las estaciones 4 a 8. Estas descargas provocan también el surgimiento de olor a ácido sulfhídrico a partir de la estación 4, indicando aumento

en la actividad biológica y contaminación industrial severa. La variación de temperatura de la estación 1 a la 9 fue de 4°C , aumento debido, probablemente, a procesos industriales que generan agua caliente que influye en la tasa de crecimiento biológico, en las reacciones químicas, en la solubilidad de los contaminantes y en el desarrollo de la biota. La conductividad eléctrica en la estación 3, donde inician las descargas industriales, se incrementa significativamente hasta la estación 8 disminuyendo en la 9. A mayor conductividad eléctrica, mayor es el contenido de sólidos disueltos en forma iónica y provenientes de las descargas industriales. El valor de pH 8 registrado en la estación 3 se debe a las descargas municipales y a la actividad de procesos industriales (textil, químico y petroquímico). Algunas industrias utilizan procesos neutralizantes en sus descargas a base de bicarbonatos y carbonatos que justificarían el incremento del pH, específicamente en esta estación, pero ello no puede asegurarse. La estación 2 recibe descargas municipales, no obstante, tiene el nivel de OD más alto, indicando que posee capacidad para mantener vivos organismos aerobios y plantas. Las otras estaciones muestran niveles de OD dentro del límite establecido en los CE-CCA-001/89, por lo que el río cuenta con capacidad autodepurativa (Sperling, 2001). Sólo el valor de OD en la estación 9 está fuera de la norma, indicando contaminación en ese punto e imposibilitando la supervivencia de la biota (Iriondo y Mota, 2004). Los parámetros de campo muestran el estado tangible del río, las variaciones en el caudal y su velocidad, los cambios de color y olor muestran la magnitud de las descargas que lo impactan, causantes de su deterioro. La estación 7 sobresale por

sus valores altos de SST y SDT debido a partículas orgánicas (materia descompuesta y compuestos químicos) e inorgánicas (iones y moléculas disueltos en el agua, minerales, metales) en solución, que podrían interactuar con los agentes químicos y biológicos responsables de los cambios de color (negro) y olor (ácido sulfhídrico) antes discutidos, que pueden incrementar la toxicidad. La estación 7 también resalta por sus altos niveles de DBO_5 y DQO (Guerra-Hernández *et al.*, 2008), lo cual indica la insuficiencia de O_2 necesario para degradar por medios biológicos y oxidar la materia orgánica por medios químicos (Sperling, 2001). La estación 9 muestra también un DQO alto debido a que es el reservorio de toda la materia orgánica que se vierte al río. Las estaciones 5 y 8 muestran valores de GyA elevados, debido a los procesos que se llevan a cabo en las industrias química, petroquímica, textil y farmacéutica, y descargas municipales. La grasa en aguas residuales interfiere con la vida acuática creando películas de materiales en flotación y afectando los procesos biológicos naturales del agua.

El N_{total} ($N_{\text{orgánico}}$ y N_{amoniaco}) está presente en exceso en todas las estaciones, debido a desechos domésticos, agrícolas e industriales. El N_{amoniaco} está presente en el agua en forma de amonía libre (NH_3) y del catión amonio (NH_4^+), indicando contaminación reciente en el cuerpo de agua y su efecto es nocivo para la fauna acuática (Jiménez, 2002). Las estaciones 1, 2 y 4 presentan alta concentración de $N_{\text{nitritos}} + N_{\text{nitratos}}$. Es probable que la presencia de bacterias inicie un proceso de desnitrificación llegando hasta la generación de N_2 molecular. Otras fuentes importantes de nitrato son los fertilizantes, principalmente en época de lluvia (Jiménez, 2002). La

presencia de P_{total} en todas las estaciones se debe al uso excesivo de fertilizantes, detergentes y a procesos de descargas industriales. Los P_{org} y los P_{orto} son producto de las descargas de agua de acondicionamiento para tuberías, torres de enfriamiento, calentadores y calderas. Siendo considerados como parámetros críticos en la calidad del agua por su influencia en el proceso de eutrofización, no se encuentran regulados por ninguna norma.

Los resultados obtenidos muestran los metales que se encuentran por debajo del límite de detección del equipo a niveles traza; éstos son Cu, Cr, Pb, Zn y Al, no representando peligro en el río. As, Cd, Ni, Fe y Mn están por debajo de los LMP de la normativa mencionada; sin embargo, su afluencia debe monitorearse continuamente para detectar su origen. La presencia de As, Cd y Ni se debe a descargas de empresas ubicadas en la estación 7, principalmente de tipo metalúrgica, química, automotriz y al uso de pesticidas, de acuerdo con Klaassen y Watkins (2001). El Cd puede ser generado por industrias de pinturas, plásticos, y los lodos de aguas domésticas y/o tratadas. El Ni presente en el río quizás proceda de plantas alimenticias, bebidas, tenería y textil. También se cuantificaron metales que no se incluyen en norma alguna, como Fe y Mn. El primero solo se detectó en la estación 8, y ambos en la 9. Estos elementos se combinan con la materia orgánica formando coloides de difícil sedimentación que aportan un olor desagradable y color indeseable (Helmut, 1991; Rainer, 1991). Por arriba de los LMP establecidos los metales detectados fueron Hg y Cr^{+6} , en las estaciones 5 y 8 respectivamente. La presencia de Hg se debe a descargas de la industria textil, química, petroquímica y metalúrgica; no obstante,

no es posible asegurar que estas empresas hagan uso excesivo de Hg y/o sus derivados (Klaassen y Watkins, 2001) y que sean responsables de su presencia en el río. La alta concentración de Hg puede derivar de cenizas dispersadas de volcanes (Popocatepetl) en el resto de las estaciones. La presencia de Cr^{+6} en la estación 9 puede deberse a descargas de tipo textil y otras como tenerías, galvanoplastias, metalúrgicas, producción de pigmentos y fertilizantes. El exceso de coliformes y la DBO_5 en la estación 7 tienen un origen común de contaminación, que puede ser identificado en la Figura 2 con descargas de tipo municipal e industrial (alimenticia, bebidas, tenerías, petroquímica, química y otras).

Los hallazgos con *V. fischeri* muestran toxicidad moderada en las estaciones 3 y 4, pero alta de la 5 a la 9, posiblemente debido a las concentraciones elevadas de N_{total} , quizá como resultado de la descomposición de la materia orgánica. El N_{amoniaca} forma NH_3 y NH_4^+ en el agua, elevando la toxicidad. La toxicidad también puede deberse a la presencia de compuestos orgánicos, como hidrocarburos poliaromáticos, herbicidas y pesticidas. Con *D. magna* se detectó toxicidad leve en la estación 3 (1UT); en las estaciones 4 a 9 se detectaron valores de 2 a 4UT, a pesar de que se registraron concentraciones traza de metales (Tabla VI). La prueba de Ames utiliza dos cepas, TA98 y TA100. La diferencia entre ellas es que la primera tiene una mutación *frameshift* y la otra una puntual en un par de bases (Takiya *et al.*, 2003). Si las pruebas resultan positivas, existe un 99% de probabilidad de afectar la salud humana por carcinogénesis (Umbuzeiro *et al.*, 2001; Takiya *et al.*, 2003). Con la cepa TA98-S9 se detectó mutagenicidad alta en la estación 6,

mientras con TA98 +S9 en la estación 8. Por otro lado, con la cepa TA100 -S9 se registró mutagenicidad alta en la estación 8, pero no se detectó con la TA100 +S9. Los resultados de la prueba de Ames con *S. typhimurium* (TA98 y TA100 sin y con activación metabólica) sugieren la presencia de compuestos orgánicos (hidrocarburos poliaromáticos, pesticidas, emulsificantes, plastificantes, dispersantes) y compuestos volátiles orgánicos (benceno, tolueno, etc.), cuya presencia se deberá determinar en el río.

Conclusiones

Los parámetros de campo indican el daño en el río causado por la contaminación debida a los asentamientos humanos y al desarrollo industrial al efectuar sus descargas en este cuerpo de agua, a pesar de haber dado un tratamiento previo a las mismas, lo cual resalta la necesidad de incluir pruebas de toxicidad y mutagenicidad en la legislación vigente. El grado de deterioro detectado con los parámetros de campo en las estaciones fue 1, 2 <3, 5 <4, 6, 7 <8, 9. El factor determinante para esta clasificación fue la cantidad de parámetros que sobrepasan los LMP de la legislación vigente. El deterioro encontrado en la presa Valsequillo concuerda con lo reportado por Silva *et al.*, (2002). La disminución del caudal en la estación 7 muestra la necesidad de limitar la extracción del recurso hídrico. Los parámetros fisicoquímicos fueron rebasados en todas las estaciones en el siguiente orden 1 <2 <4, 6 <3, 5, 9 <8 <7. Las estaciones 7 y 8 (Tablas III y IV) se destacan por los máximos valores de SST, SDT, SSe, DBO_5 , DQO, GyA, N_{total} , N_{amoniaca} , N_{org} , P_{total} y P_{org} , mostrando el impacto de las descargas de origen industrial y municipal en el río, confirmando lo reportado por Valladares

et al., (2005). Los metales detectados de menor a mayor concentración fueron: Hg (en estación 5) <As (en 7) <Ni (en 7) <Cd (en 7) < Cr^{6+} (en 8) <Mn (en 9) <Fe (en estación 8). La presencia de estos metales concuerda con los resultados de otros estudios (Silva *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 1995; Saldaña y Gómez, 2006; CONAGUA, 2007b; Navarro *et al.*, 2007). La contaminación microbiológica rebasa el LMP en todas las estaciones, destacándose la 7 y la 9 (Tabla VII), resultados que coinciden con los de Silva *et al.*, (2002) quienes reportaron contaminación del río por drenajes municipales e industriales. Los resultados de los análisis toxicológicos y mutagénicos revelaron la presencia de compuestos tóxicos que no fueron detectados por los métodos de análisis convencionales de la estación 3 a la 9. *V. fischeri* registró toxicidad de menor a mayor concentración en las estaciones 4 <3 <7 <6 <9 <8 <5. *D. magna*, en orden de menor a mayor concentración, en las estaciones 3 <6 <5 <4 <7 <9 <8. La prueba de Ames detectó mutagenicidad de menor a mayor concentración en las estaciones 4 <3 <5 <8 <9 <6. Los resultados posiblemente se deban a la presencia de compuestos orgánicos (HPA's), que no fueron determinados en este trabajo por no estar incluidos en las normativas actuales y están siendo evaluados a raíz de los resultados toxicológicos y mutagénicos. La norma vigente se respeta y se pone en práctica; sin embargo, no es suficiente para determinar con mayor precisión el deterioro en la calidad del agua del río. En la medida en que este tipo de bioensayos sea accesible será una alternativa para un mejor monitoreo de las descargas, por lo cual se hace necesario cambiar la legislación vigente como un reto a corto plazo, con el fin de generar información

para la toma de decisiones por las instancias pertinentes, en concordancia con Saldaña *et al.* (2002a, b) y CONAGUA (2007a, b).

Por otro lado, se debe mejorar la eficiencia de las PTARs municipales e industriales, ya que esto permitiría contar con medidas de saneamiento específicas para los problemas detectados en este estudio, tales como el implemento de tratamientos avanzados, con nuevas tecnologías de clarificación biológica con enzimas u organismos inmovilizados (Salgado *et al.*, 2006; Núñez *et al.*, 2007); de desodorización, empleando reactores biológicos como biofiltros (Le Cloire *et al.*, 2001); de nanofiltración avanzada para eliminar SST (Adham *et al.*, 2006); de remoción de nutrientes por procesos de nitrificación-desnitrificación, remoción de amonio acuoso (Arriaga *et al.*, 2003), desgasificación del amoniaco, precipitación química, asimilación; de remoción de compuestos inorgánicos disueltos mediante electrodiálisis, intercambio iónico, ósmosis inversa y precipitación (Kabra *et al.*, 2004); eliminación de coliformes mediante radiación solar (Rizzo, 2009); y remoción de compuestos orgánicos disueltos por adsorción u oxidación química (Bubnov *et al.*, 2006).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, a través de la Subcoordinación de Calidad de Agua, para la realización de esta investigación, que forma parte de un trabajo de tesis doctoral.

REFERENCIAS

- Adham S, Chiue K, Lehman G, Mysore C, Clouet J (2006) Optimization of Membrane Treatment for Direct and Clarified Water Filtration. Report Series 91111F ISBN 9781843399674. AWWARF. Denver, CO, EEUU. 196 pp.

- Arriaga ARE, García LRA, Soto GGE (2003) A Peach stone activated carbon chemically modified to absorb aqueous ammonia. *J. Chil. Chem. Soc.* 48: 65-68.
- Bubnov AG, Grinevich VI, Maslova ON (2006) Barrier-discharge plasma treatment of surface water to remove organic compounds. *Rus. J. Appl. Chem.* 79: 934-940.
- Bulich AA (1982) A practical and reliable method for monitoring the toxicity of aquatic samples. *Proc. Biochem.* (March-April); 45-47
- CONAGUA (2007a) *Estudio y Declaratoria de Clasificación de los Ríos Atoyac y Zahuapan*. www.cbalsas.org.mx/GruposConsejo/GrupoSegEvaluacion/ Presentaciones/pres31sesion/6APresentacion_RioAtoyac-Zahuapan.pdf
- CONAGUA (2007b) *Clasificación de Cuerpos de Agua Nacionales Río Atoyac y Zahuapan*. www2.ine.gob.mx/dgcnica/descargas/pres_proname_ago2008_e_gutierrez.pdf
- Flores QR, Aceves-Capri S, Ramírez MI (2004) *Viabilidad del Potencial Uso Acuicola de la Carpa Común (Cyprius carpio) en la Presa Manuel Ávila Camacho, Puebla, México*. www.tupublicas.com/docs/04-03-2004-53-exposicion.pdf
- Guerra-Hernández E, Balán-Hernández LL, Guerrero OR, Campos LLS (2008) Una mirada a los recursos hídricos en la zona alta de la subcuenca del Río Atoyac. *Mem. VII Cong. Int., XIII Cong. Nac., III Reg. de Ciencias Ambientales*. 4-6 Junio. Cd Obregón, México.
- Helmut AH (1991) Iron. En Merian E (Ed.) *Metals and their Compounds in the Environment*. VCH. Nueva York, NY, EEUU. pp 945-958.
- INEGI (2004) *Anuario Estadístico. Puebla*. Tomo I y II. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, México.
- INEGI (2008) www.mapserv.inegi.org.mx/geografia/español/estados/endomex/ sombreado_riocfm?c=444&e=18
- Iriondo A, Mota J (2004) Desarrollo de una red neuronal para estimar el oxígeno disuelto en el agua a partir de instrumentación de EDAR. *XXV Jornadas de Automática*. 8-10 de Septiembre. Universidad de Castilla la Mancha. Ciudad Real, España.
- Jiménez CBE (2002) La contaminación ambiental en México. Cap. 2. *La Contaminación del Agua*. Limusa. México. pp. 33-315.
- Kabra K, Chaudhary R, Sawhney RL (2004) Treatment of hazardous organic and inorganic compounds through aqueous-phase photocatalysis: A review. *Indust. Eng. Chem. Res.* 43: 7683-7696.
- Klaasen CD, Watkins BJ (2001) Efectos tóxicos de metales. En *Manual de Toxicología*. Capítulo 23. McGraw-Hill. México. pp. 659-722.
- Le Cloire P, Humeau P, Ramírez-López EM (2001) Biotreatments of odours: control and performance of biofilters and a bioscrubber. *Water Sci. Technol.* 44: 219-226.
- Ley Federal de Derechos de Agua (2007) Reforma 35 www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lfd/LFD_ref35_24dic07.pdf
- Mangas RE, Sánchez MM, Molina A, Hugo R, García-Flores LM, Muñoz-Gutiérrez I, Zumaquero RJL (2005) *Análisis de las Políticas de Rehabilitación de Presas: El Caso de la "Presa de Valsequillo" en el Estado de Puebla*. www.comunicacion.buap.mx/reportajes_especiales/reportaje_especial_valsequillo.html
- Méndez GT, Flores RA, Palacios MS (1995) Presencia de Pb, Cr, Co y Cd en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 030 Tecamachalco Estado de Puebla. *Mem. XXVI Cong. Nac. Ciencia del Suelo*. Cd. Victoria, México. p. 36.
- Méndez GT, Rodríguez DL, Palacios M (2000) Impacto del riego con aguas contaminadas evaluadas a través de la presencia de metales pesados en suelos. *Terra* 18: 277-278.
- Mortenmals K, Zeiger E (2000) The Ames Salmonella/microsome mutagenicity assay. *Mut. Res.* 455: 29-60.
- Navarro AE, Rincón C, Rosas E, Aguilar AP, Contreras S, Caso LR, Bayona JM, Velasco F, Sánchez A, Vázquez A, Martínez CT, Díaz M, Pérez A, Malajevich A, Cuellar I, Navarrete D, Cid S (2007) El agua en la Subcuenca del Nexapa, México: Necesidad de una gestión integral. *Conferencia Latinoamericana de Saneamiento*. 12-16 Noviembre. Cali, Colombia.
- Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 SCFI *Aguas Residuales-Muestreo* www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-003-1980.pdf
- Norma Mexicana NMX-AA-087-1995-SCFI *Análisis de Agua-Evaluación de Toxicidad Aguda con Daphnia magna Status (Crustacea-Cladocero)-Método de Prueba*. www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-087-1995.pdf
- Norma Mexicana NMX-AA-112-1995-SCFI *Análisis de Agua y Sedimentos-Evaluación de Toxicidad Aguda con Photobacterium phosphoreum-Método de Prueba*. www.semarnat.gob.mx/leyesynormas/Normas%20Mexicanas%20vigentes/NMX-AA-112-1995.pdf
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 *Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales*. www.economia.gob.mx/work/normas/noms/1997/001-ecol.pdf
- Núñez APN, Cruz SR, Folch MJL, Villegas E (2007) Degradación de los colorantes, remazol brilliant blue R y 4-phenylazoaniline con lacasas fúngicas libres e inmovilizadas. *Mem. VII Cong. Nac. Biología Molecular y Celular de Hongos de la Sociedad Mexicana de Bioquímica*. 5-8 Nov. Guanajuato, México.
- OECD (1995) Guidelines for testing of chemicals Genetic Toxicology: *Salmonella typhimurium. Reverse. Mutat. Assay* 471: 1-9.
- Rainer SE (1991) Manganese. En Merian E (Ed.) *Metals and their Compounds in the Environment*. VCH. Nueva York, NY, EEUU. Cap. II-19.
- Rizzo L (2009) Inactivation and injury of total coliform bacteria after primary disinfection of drinking water by TiO₂ photocatalysis. *J. Haz. Mat.* 164: 48-51.
- Saldaña FP, Gómez BMA (2006) Caracterización de fuentes puntuales de contaminación en el río Atoyac, México. *Mem. XXX Cong. Interam. Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 26-30 Nov. Punta del Este, Uruguay.
- Saldaña FP, Alcocer Y VH, Lerdo de Tejada BA, Gómez BMA (2002a) Calidad del Agua en Colectores de la Ciudad de Puebla y la Aplicación de Análisis de Toxicidad. *XXVIII Cong. Interam. Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. 27-31 Oct. Cancún, México.
- Saldaña, P, Lerdo de Tejada A, Gómez MA, López R (2002b) La importancia de incluir análisis de toxicidad en descargas industriales y municipales que afectan los cuerpos receptores. *Cong. Nac. Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*. 17-20 Abr. Guanajuato, México.
- Salgado J, Sandoval AM, Espinosa E, Dantán E, Silva S, Méndez M, Folch JL, Villegas E (2006) Purificación y caracterización de lacasas extracelulares de *Pycnoporus sanguineus* aplicadas al tratamiento de colorantes y evaluación toxicológica del proceso. *Mem. V Cong. Int. y XI Cong. Nac. de Ciencias Ambientales*. 7-9 de Junio. Oaxtepec, México.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) (1989) *Acuerdo por el que se Establecen los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua CE-CCA-001/1989*. Diario Oficial de la Federación del 2/12/1989. Tomo CDXXX, No 9. México.
- Silva GSE, Muñoz OA, De la Isla de Bauer ML, Infante GS (2002) Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1 Agua. *Terra* 20: 243-251.
- Sperling MV (2001) *Principios Básicos de Tratamiento de Esgotos*. 4ª ed. Universidade Federal de Minas Gerais. Brasil. 211 pp.
- Takiya T, Horie Y, Futo S, Matsumoto Y, Kawai K, Zuzuki T (2003) Rapid selection of nonhotspot mutants among hhdD+ revertants of *Salmonella typhimurium* TA98 in Ames test by peptide nucleic acid (PNA)-mediated PCR clamping. *J. Biosci. Bioeng.* 96: 588-590.
- Umbuzeiro A, Roubicek D, Sánchez P, Sato MZ (2001) The *Salmonella mutagenicity assay* in a surface water quality monitoring program based on a 20-year survey. *Mut. Res.* 49: 119-126.
- Valladares MR, Flores E, Navarro I (2005) Estudio de la calidad del agua residual que descarga al Río Atoyac: comunidades, ong, e investigadores unidos. II Encuentro participación de la mujer en la Ciencia. 19-20 Mayo. León, México.