

## DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO Y POBLACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN, TLAXCALA, MÉXICO

Hipólito MUÑOZ-NAVA<sup>1\*</sup>, Juan SUÁREZ-SÁNCHEZ<sup>2</sup>, Andrea VERA-REYES<sup>1</sup>, Saturnino OROZCO-FLORES<sup>1</sup>, Jorge BATLLE-SALES<sup>3</sup>, Alberto de Jesús ORTIZ-ZAMORA<sup>2</sup> y Juan MENDIOLA-ARGÜELLES<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación en Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Aut. Texmelucan-Tlaxcala km 10.2, Ixtacuixtla 90120, Tlaxcala, México. Correo electrónico: hipolito78@hotmail.com

<sup>2</sup> Laboratorio de Medio Ambiente, Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Aut. Texmelucan-Tlaxcala km 10.2, Ixtacuixtla 90120, Tlaxcala, México

<sup>3</sup> Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Valencia, Avda. Vicent Andrés Estelles s/n, 46100 Burjasot, Valencia, España

<sup>4</sup> Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Agrobiología, Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Aut. Texmelucan-Tlaxcala km 10.2, Ixtacuixtla 90120, Tlaxcala, México

*(Recibido febrero 2010, aceptado octubre 2011)*

Palabras clave: contaminación, microcuencas, correlación

### RESUMEN

La contaminación de los ríos en México es un problema ambiental. Las fuentes de materia orgánica son diversas y entre ellas se encuentran las actividades agrícolas, industriales y las aguas residuales generadas en las zonas urbanas y rurales. Este trabajo tiene como objetivo correlacionar la materia orgánica como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con la población humana que habita en la subcuenca del Río Zahuapan. Se seleccionaron doce puntos donde se realizaron muestreos mensuales, durante un año, de la corriente de agua. Se determinaron once parámetros fisicoquímicos siguiendo las normas mexicanas correspondientes. En la temporada de sequía se midió la sección hidráulica y velocidad de la corriente. La sección hidráulica se calculó con la anchura y profundidad del río en tramos de 20 cm. Con la velocidad de la corriente y la sección hidráulica se calculó el gasto hidráulico del río. La carga de la DBO ( $\text{gs}^{-1}$ ) se estimó multiplicando la concentración de DBO por el gasto del río. Por medio del programa TAS se definieron las microcuencas de los puntos de muestreo. Las localidades pertenecientes a cada microcuenca se agruparon de acuerdo con el tamaño de su población y su distancia de la línea del cauce del río. Se encontraron correlaciones con valores de  $r^2 > 0.8$  en las microcuencas con escasa actividad industrial y agrícola. La correlación entre DBO y DQO resultó la más alta, con un valor de  $r^2 = 0.733$ . En la subcuenca del Río Zahuapan viven aproximadamente 523 830 personas, que representan 59 % de los habitantes del estado de Tlaxcala. 67 % de la población que habita en el área de influencia de los puntos de muestreo está concentrada en localidades de 1001-5000 y de 20001-50000 habitantes. Se encontró que la DBO es explicada por la población asentada hasta 20 km de la línea del cauce del río.

Key words: pollution, microbasin, correlation

## ABSTRACT

River pollution is an environmental concern in Mexico. The sources of organic material are diverse, and include agricultural and industrial activity, as well as urban and rural wastewater. The aim of this study was to examine the correlation between organic material (biochemical oxygen demand, BOD) and human population in the Zahuapan river subbasin. Twelve points were selected for monthly river stream sampling, for a period of one year. Eleven physicochemical properties based on the corresponding official Mexican standards were measured. Speed, width and depth of the stream were measured every 20 cm during the dry season, in order to calculate the hydraulic cross section and hydraulic load of the river. The microbasins of the sampling points were defined using the TAS software. The towns in each microbasin were grouped by population and distance from the watercourse. Correlations of  $r^2 > 0.8$  were found in microbasins with little industrial or agricultural activity. The correlation between BOD and chemical oxygen demand (COD) was the highest, with  $r^2 = 0.733$ . The population living in the Zahuapan river subbasin is approximately 523 830, which represents 59 % of Tlaxcala's state population. Of the population living in the influence area of the sampling points, 67 % live in towns with a population 1001–5000 or 20 001–50 000 inhabitants. A considerable proportion of the calculated BOD load is explained by populations located within 20 km radius from the river.

## INTRODUCCIÓN

Aunque la tendencia del mejoramiento de la calidad del agua está en aumento por lo menos en cuanto a demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (CONAGUA 2008), la contaminación de los ríos es un problema ambiental grave en la República Mexicana. Las fuentes de materia orgánica son diversas y entre ellas se encuentran las actividades agrícolas, industriales y las aguas residuales generadas en zonas urbanas y rurales.

Existen múltiples estudios en torno a la identificación de fuentes de contaminación de ríos. Noss (1984) realizó una revisión para identificar el origen y los principales contribuyentes de la contaminación del agua en Estados Unidos de América (EUA). Dimitrova *et al.* (1998) establecieron el grado de contaminación de los ríos y fuentes de contaminación en la región de Devnya, Bulgaria, donde hay una importante actividad industrial. Chen y Chang (1998) utilizaron un algoritmo genético como técnica de optimización para identificar la mejor estrategia de control de la contaminación del río Tseng-Wen en Taiwan. Nagy y Jung (2005) estudiaron el impacto antrópico sobre el ambiente acuático de la cuenca Mogyoród-Brook en Hungría. McDonald *et al.* (2006) desarrollaron un método bacteriológico para identificar las fuentes de contaminación fecal. Alexander *et al.* (2008) realizaron un estudio de las corrientes de las subcuencas de los tributarios del río

Mississippi, para encontrar las fuentes de nitrógeno y fósforo en dicha cuenca. Li *et al.* (2007) examinaron la calidad del agua de diez lagos de la Provincia de Yunnan, China, e hicieron correlaciones entre las variables para identificar las fuentes de contaminación. Rivera-Vázquez *et al.* (2007) estudiaron las descargas a las microcuencas de los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino para determinar su grado de contaminación por coliformes y helmintos. Kingsbury *et al.* (2008) caracterizaron la ocurrencia de 258 compuestos orgánicos antrópicos (plaguicidas, hidrocarburos, solventes de uso personal y doméstico) en nueve comunidades de EUA por medio de muestreos durante doce meses. Johnson *et al.* (2009) utilizaron los métodos paramétrico y no paramétrico para evaluar las tendencias de la contaminación del río Minnesota.

En el estado de Tlaxcala, la mayoría de los centros poblacionales, vierten sus aguas residuales sin tratamiento al cauce de ríos o barrancas (observaciones realizadas en campo por los autores). Esto se debe principalmente a que carecen o no operan los sistemas de tratamiento correspondientes, ya sea por motivos políticos, económicos o de otra índole. Debido a lo anterior, es urgente realizar estudios que contribuyan al saneamiento de los cuerpos de agua. El objetivo de este trabajo es determinar las magnitudes de las correlaciones entre parámetros fisicoquímicos y la correlación entre la carga orgánica presente en la corriente del río Zahuapan con la población asentada en la subcuenca, usando como indicador a la DBO.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Las 1471 cuencas hidrográficas que existen en la República Mexicana han sido agrupadas para fines administrativos por la Comisión Nacional del Agua en 37 regiones hidrológicas (CONAGUA 2008). La región hidrológica 18 (RH 18) escurre hacia el Océano Pacífico, formando el río Balsas. En ella habitan más de diez millones de personas, tiene una extensión de 118 268 km<sup>2</sup>, la precipitación normal es de 949.7 mm, su volumen de escurrimiento es de 17 057 hm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> y está conformada por quince cuencas hidrológicas (CONAGUA 2008). Una de estas cuencas forma el río Atoyac, que a su vez tiene como tributario al río Zahuapan. La subcuenca de este río se encuentra en la parte alta de la cuenca del Atoyac, dentro de la Faja Volcánica Transmexicana y es una de las cabeceras de la cuenca del río Balsas. La mayor parte de la subcuenca del río Zahuapan se encuentra en el Estado de Tlaxcala.

La altura sobre el nivel del mar del río Zahuapan se encuentra entre 3380 y 2178 metros, por lo que se puede clasificar como alto y a la subcuenca como grande debido a su área de captación de 1725 km<sup>2</sup> (DOCE 2000). Su red de drenaje es compleja puesto que la roca de la Faja Volcánica Transmexicana, y por lo tanto de la subcuenca, tiene una composición química poco típica de los cinturones volcánicos asociados a los límites convergentes de placas. La abundancia de óxidos de sodio y potasio con respecto a la de óxidos de silicio es normalmente menor en los cinturones volcánicos asociados a los límites convergentes de placas (Martínez *et al.* 2007).

El río Zahuapan está dividido en dos segmentos por la presa de Atlangatepec. El segmento que descarga a la presa tiene una longitud de 23 km y la que se une al río Atoyac es de 75 km. La dirección de la corriente es de norte a sur y tiene una pendiente media de 0.011. La anchura y profundidad del río es variable a lo largo de su trayectoria. La precipitación media anual es de aproximadamente 700 mm. En el norte de la subcuenca, la actividad económica predominante es la agricultura de temporal; en el sur hay una combinación de actividades agrícola (de riego y de temporal) e industrial. La población se encuentra concentrada en el centro-sur de la subcuenca, con densidades poblacionales en algunas áreas urbanas a 1000 hab km<sup>-2</sup>.

### Puntos de muestreo

La selección de los puntos de muestreo de la corriente del río se realizó empleando ortofotos (INEGI

1999a) y recorridos a pie en la ribera; se definieron once puntos donde se une el tributario al río. Se eligió otro punto cerca del nacimiento del río como testigo. El muestreo del agua se realizó mensualmente de septiembre de 2006 a agosto de 2007, siguiendo los lineamientos de la NMX-AA-003-1980 (SECOFI 1980). La recolección de las muestras se hizo del punto de nacimiento del río al último tributario. Las muestras se transportaron al laboratorio de Análisis de Agua de la Coordinación General de Ecología, Gobierno del Estado de Tlaxcala. Se realizaron las determinaciones analíticas con base en las Normas Mexicanas respectivas de turbiedad (Turb), sólidos totales (ST), sólidos totales flotantes (STF), sólidos totales volátiles (STV), cloruros (Cl<sup>-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (NT), nitrógeno amoniacal (NH<sub>3</sub>), nitrógeno orgánico (Norg), nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), fosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), grasas y aceites (GyA), sustancias activas al azul de metileno (SAAM) y coliformes fecales (CF). El análisis de resultados en este trabajo se centra en la DBO.

La carga de la DBO (gL<sup>-1</sup>) definida como el producto de la concentración y el gasto hidráulico del río se estimó de la siguiente manera. Durante la temporada de sequía se midió la velocidad de la corriente, la anchura y la profundidad, ésta última cada 20 cm, para calcular el área de la sección hidráulica del río. Las mediciones de velocidad de la corriente se realizaron con un sensor electromagnético portátil Marsh-McBirney Flo-Mate™ Modelo 2000. Con los datos de profundidad se dibujó el polígono de la sección hidráulica en el software ArcView® y se calculó el área. Multiplicando la velocidad de la corriente por el área de la sección hidráulica, se obtuvo el gasto hidráulico del río Zahuapan. En esta temporada del año la corriente se debe principalmente a las descargas de agua residuales, por lo que la medición del gasto es representativa para medir este parámetro.

Se estableció como criterio que los puntos de muestreo seleccionados fueran salidas de las microcuencas. Empleando el software de dominio público Terrain Analysis System (TAS), versión 2.0.9 (Lindsay 2005), se generaron polígonos que definen el parteaguas de cada microcuenca y por lo tanto las áreas de captación. El modelo digital de elevación (MDE) es el insumo base que utiliza TAS; éste se creó en ArcView® a partir de los vectoriales de las curvas de nivel a cada 10 metros, publicados por INEGI (1999b).

El censo de población realizado por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI 2005) reporta que el estado de Tlaxcala tiene

una población de 1 068 207 habitantes, ubicadas en 1239 localidades. Se utilizó un archivo *shapefile* de las localidades (INEGI 1999c) y se actualizó la base de datos de población con información del último censo. Las localidades se agruparon tomando en cuenta su tamaño: 1-100, 101-1000, 1001-5000, 5001-10 000, 10 001-15 000, 15 001-20 000 y 20 001-50 000 habitantes. La CONAGUA (2008) clasifica a las localidades mayores de 2500 habitantes como zonas urbanas y a las menores como rurales.

La estadística básica se realizó con el programa Statistica®, usando los datos de los parámetros fisicoquímicos; los resultados se compararon con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (SEMARNAT 2003) y en los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 (SEDUE 1989). Las relaciones entre los parámetros fisicoquímicos considerados en este trabajo y la relación del número de habitantes de cada microcuenca con la DBO se midieron mediante el coeficiente de determinación  $r^2$ . Para esta última relación se empleó la carga de la DBO ( $\text{g L}^{-1}$ ) estimado como se ha descrito anteriormente. La carga de DBO en el punto de muestreo representa la suma de las aportaciones de cada localidad que está conectada hidrológicamente a este punto.

Se graficó el gasto de DBO calculado para cada punto de muestreo contra el número acumulado de habitantes de las localidades ubicadas a las siguientes distancias (km): <1, 1-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30 y >30. La pertenencia de las localidades a un punto de muestreo dado se definió empleando los polígonos de las microcuencas generados con TAS. Para el cálculo de las distancias se empleó ArcView®, ortofotos digitales y los archivos *shapefile* de las localidades (INEGI 1999a,c). Cada localidad que descarga sus aguas residuales se unió por medio de una línea al punto de muestreo, trazada siguiendo la trayectoria de los barrancos y de canales en las ortofotos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los doce puntos de muestreo se indican de acuerdo con su posición en el río: El Pardo, Tlaxco, Atlangatepec, Muñoz, Xaltocan, San Benito, Amaxac, Dos Arroyos, Jardín Botánico, Trébol, Texoloc y Zacatelco. Por otra parte, se obtuvieron datos de dos muestras de agua residual obtenidas directamente del tubo de drenaje que colecta el agua residual de una parte de la localidad de San Bernardino Contla.

La temperatura más baja del agua fue de 11.5 °C en El Pardo y la más alta de 23.2 °C en el Trébol. El

pH se encontró entre 7.1 y 8.2. Los valores de conductividad eléctrica oscilaron entre 12.7 y 3696  $\mu\text{S}$ . En el **cuadro I** se muestra la media, el mínimo, el máximo y la desviación estándar de los datos correspondientes a diecisiete parámetros fisicoquímicos. En el **cuadro II** se presentan los porcentajes de datos que están fuera de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996 y de los criterios ecológicos CE-CCA-001/89. Los porcentajes de datos de CF son iguales en ambas referencias. Dos Arroyos y Zacatelco tuvieron los valores más altos de CF, incluso mayores a los obtenidos por Rivera-Vázquez *et al.* (2007). En los puntos de muestreo Dos Arroyos y Trébol, 60 y 50 % de los datos superaron los 15  $\text{mgL}^{-1}$  de Gya, que es el límite establecido en la norma para uso en riego agrícola. En Tlaxco, Muñoz, San Benito y Dos Arroyos 100 % de las muestras sobrepasaron el límite de 0.05  $\text{mgL}^{-1}$  de fosfatos. La actividad predominante en estas microcuencas es la agricultura y la ganadería principalmente de toros de lidia (observaciones de campo de los autores). Alexander *et al.* (2008) encontraron que el estiércol depositado por los animales en las áreas de pastoreo es el principal contribuyente de fósforo en el Golfo de México por el Río Mississippi. Respecto a la DBO, 20 % de los datos de Dos Arroyos y Zacatelco excedieron el límite de 150  $\text{mg L}^{-1}$  establecido en la norma. Una muestra del Jardín Botánico que representa el 11 % de los datos tuvo una concentración de NT mayor de 40  $\text{mg L}^{-1}$ . Los promedios más altos de NT se obtuvieron en Muñoz, Xaltocan y Zacatelco, mismos que son varias veces mayores a 1.34 y 0.95  $\text{mg L}^{-1}$ , reportados por Hayakawa *et al.* (2006) en un estudio realizado en corrientes de dos cuencas. Con relación al nitrógeno amoniacal y a los sulfatos, el 100 % de los datos de los doce puntos superaron valores de 0.06 y de 0.005  $\text{mgL}^{-1}$ , que son los límites máximos establecidos para estos parámetros en los criterios ecológicos de calidad del agua. El límite máximo de cloruros en los CE-CCA-001/89 igual a 250  $\text{mg L}^{-1}$  fue excedido sólo en una muestra de Texoloc; también en este punto el 100 % de las muestras sobrepasaron 0.1  $\text{mg L}^{-1}$  de SAAM. El Pardo y Atlangatepec mostraron los promedios más altos de OD, siendo para el primero de 8.09 y para el segundo de 6.18  $\text{mg L}^{-1}$ . Con base en los criterios ecológicos, en Dos Arroyos y Zacatelco 100 % de los datos son menores al valor mínimo de 5.0  $\text{mg L}^{-1}$  de OD. El valor de oxígeno disuelto a saturación teórica a una temperatura del agua de 11.5 °C (temperatura más baja medida en El Pardo) es de 7.70  $\text{mg L}^{-1}$  para El Pardo a una altura sobre el nivel del mar (asnm) de 2680 m y de 7.96  $\text{mg L}^{-1}$  para Atlangatepec a una asnm de 2482 m. El punto de muestreo El Pardo

**CUADRO I. MEDIA, MÍNIMO, MÁXIMO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS PARÁMETROS QUÍMICOS DETERMINADOS (TODOS EN mg L<sup>-1</sup>, A MENOS QUE SE INDIQUE OTRA UNIDAD)**

Punto de muestreo	Estadístico	Turbiedad*	ST	STF	STV	OD	DBO	DOO	NH <sub>3</sub>	Norg	NT	NO <sub>3</sub>	Fosfatos	Cloruros	Sulfatos	GVA	SAAM	CF**	
El Pardo n=9	Media	200.73	392.89	345.33	47.56	8.09	6.01	23.09	0.67	1.47	2.14	0.86	5.09	12.96	66.32	6.75	0.06	5.44E+04	
	Min.	10.40	136.00	112.00	12.00	4.14	0.74	2.16	0.47	0.69	1.16	0.03	0.01	7.78	19.70	0.00	0.01	0.00E+00	
	Max.	1000.00	2152.00	1968.00	184.00	11.56	18.54	88.01	88.01	1.08	3.39	4.03	1.91	14.61	23.17	224.72	25.64	0.33	4.60E+05
	D.E.***	356.67	660.75	609.25	52.86	2.44	5.90	27.12	0.23	0.85	0.95	0.69	6.24	4.80	62.41	8.35	0.11	1.52E+05	
Tlaxco n=10	Media	312.04	733.20	554.40	178.80	1.65	57.71	168.32	9.95	4.90	14.84	0.91	18.62	60.85	96.32	9.91	4.89	4.25E+06	
	Min.	5.98	216.00	172.00	44.00	0.00	15.52	52.20	1.67	1.34	5.75	0.36	2.08	29.16	20.93	0.34	0.01	1.10E+07	
	Max.	1000.00	1568.00	1380.00	272.00	8.28	125.70	311.46	19.76	14.52	32.69	2.34	45.01	120.53	220.96	18.62	9.45	1.10E+07	
	D.E.	401.10	436.88	417.59	78.93	2.64	40.16	84.45	6.67	3.69	9.06	0.58	13.05	26.62	56.12	5.84	3.59	4.63E+06	
Atlantatepec n=9	Media	24.01	248.00	193.33	54.67	6.18	8.38	27.06	0.60	1.66	2.27	0.60	1.00	31.76	69.58	10.85	0.26	9.96E+03	
	Min.	2.12	184.00	128.00	32.00	2.00	2.15	5.18	0.31	0.77	1.20	0.14	0.01	16.55	28.91	4.62	0.01	2.30E+03	
	Max.	78.40	364.00	292.00	76.00	11.17	19.57	73.91	0.95	4.08	4.52	1.65	8.95	61.23	270.33	30.64	1.90	4.60E+04	
	D.E.	29.21	67.94	60.33	13.71	2.85	5.79	23.27	0.23	1.08	1.11	0.54	2.98	14.45	76.11	8.71	0.62	1.38E+04	
Muñoz n=9	Media	131.09	520.44	383.11	137.33	3.63	33.77	79.70	9.41	2.46	11.87	1.15	19.05	59.16	82.58	12.19	0.45	3.79E+05	
	Min.	10.70	332.00	280.00	52.00	1.59	11.35	28.14	4.52	0.84	5.94	0.28	3.62	25.27	29.52	4.42	0.01	4.30E+03	
	Max.	839.00	860.00	604.00	256.00	5.72	83.00	169.87	17.01	4.91	19.25	3.35	50.33	114.70	347.60	22.33	1.99	1.10E+06	
	D.E.	266.73	149.35	105.56	63.31	1.49	28.30	52.37	4.38	1.31	4.89	0.97	15.61	28.66	100.30	5.56	0.70	4.09E+05	
Xaltocan n=10	Media	83.97	550.80	384.40	166.40	2.99	83.50	181.63	15.39	5.51	20.90	0.95	19.62	48.67	72.12	13.01	5.76	6.63E+06	
	Min.	22.40	432.00	300.00	16.00	0.00	15.52	46.51	3.94	0.45	5.87	0.18	0.02	19.44	39.35	5.22	0.01	4.30E+04	
	Max.	203.00	880.00	572.00	312.00	6.71	157.63	440.05	29.48	16.18	38.00	3.93	40.54	99.29	107.97	22.14	15.59	4.60E+07	
	D.E.	67.16	135.07	91.42	91.51	2.28	45.48	105.83	9.51	4.49	12.33	1.14	10.96	21.73	20.57	5.09	5.46	1.41E+07	
San Benito n=10	Media	30.73	903.60	767.20	136.40	2.52	71.03	127.71	5.67	3.07	8.74	0.73	8.99	60.99	199.73	14.93	3.08	6.88E+06	
	Min.	6.99	540.00	392.00	12.00	0.00	12.81	47.08	0.18	1.10	1.28	0.14	1.39	25.27	22.15	6.11	0.01	9.30E+04	
	Max.	80.60	1320.00	1104.00	216.00	5.27	169.93	245.94	16.43	5.97	18.04	2.06	19.25	91.37	427.25	27.30	8.89	4.30E+07	
	D.E.	23.56	266.57	238.73	52.61	2.08	57.01	68.09	4.37	1.46	4.42	0.59	6.49	18.42	145.58	6.84	3.43	1.31E+07	
Amaxac n=10	Media	211.66	738.00	623.60	114.40	2.26	34.53	93.96	6.80	2.73	9.54	0.78	6.68	110.99	71.44	13.06	1.59	5.11E+06	
	Min.	11.70	436.00	324.00	8.00	0.00	19.63	37.28	2.24	0.95	3.73	0.14	0.01	19.44	30.14	3.13	0.01	4.30E+04	
	Max.	998.00	1128.00	992.00	224.00	5.64	68.96	196.59	11.70	6.70	14.77	2.08	20.45	233.33	171.08	21.78	3.99	4.60E+07	
	D.E.	383.16	207.84	201.53	59.19	2.39	15.82	46.10	3.30	1.68	4.07	0.70	6.45	61.67	40.44	6.54	1.45	1.44E+07	
Dos Arroyos n=10	Media	104.89	697.20	463.60	233.60	0.64	132.86	286.88	10.33	7.04	17.37	0.74	14.00	77.17	90.17	17.86	5.33	1.18E+08	
	Min.	26.30	448.00	288.00	12.00	0.00	30.54	66.10	3.23	1.03	4.26	0.14	4.48	27.22	38.09	4.02	0.01	2.30E+05	
	Max.	358.00	1208.00	700.00	704.00	3.66	510.11	958.95	17.83	22.25	25.58	2.02	28.14	229.40	287.72	39.86	11.14	1.10E+09	
	D.E.	94.42	268.94	158.69	188.89	1.21	139.25	252.90	5.17	6.09	6.83	0.57	8.97	59.53	78.23	12.83	3.81	3.45E+08	
Jardín Botánico n=9	Media	119.61	510.67	380.00	130.67	2.35	55.11	134.81	16.63	4.05	20.68	0.99	6.77	64.85	59.44	10.53	4.02	6.26E+07	
	Min.	17.10	368.00	296.00	56.00	0.00	20.36	35.38	4.32	0.56	5.94	0.14	0.01	23.33	35.18	5.16	0.01	2.30E+05	
	Max.	733.00	644.00	588.00	260.00	5.58	105.41	241.18	35.97	7.30	43.27	2.83	13.58	205.20	106.89	26.29	8.55	4.60E+08	
	D.E.	231.26	102.63	88.29	67.76	2.22	32.41	79.17	10.16	2.04	11.88	0.85	6.27	54.59	22.24	6.58	3.15	1.61E+08	

CUADRO I. CONTINUACIÓN

Trébol n=10	Media	307.86	730.40	600.00	130.40	5.34	40.28	111.76	5.44	3.97	9.42	1.44	6.58	61.36	69.46	14.66	4.14	9.51E+06
	Min.	2.87	416.00	328.00	20.00	0.00	13.05	26.90	0.49	1.14	2.37	0.14	0.01	19.44	30.75	4.68	0.01	2.30E+05
	Max.	1000.00	1196.00	956.00	432.00	8.19	126.48	370.07	22.77	9.42	32.19	7.19	28.52	140.66	156.93	22.24	23.20	2.40E+07
	D.E.	348.70	281.69	218.75	112.70	2.58	39.02	107.13	6.62	2.97	9.09	2.07	8.58	41.66	37.02	5.43	7.17	8.45E+06
Texoloc n=9	Media	158.34	874.67	550.67	324.00	1.76	38.63	78.51	6.45	3.82	10.28	0.59	2.96	103.02	54.82	14.32	2.70	3.19E+06
	Min.	15.20	620.00	232.00	44.00	0.00	16.57	22.73	2.07	1.22	4.31	0.14	0.01	44.68	16.01	6.49	0.62	1.40E+05
	Max.	1000.00	1560.00	884.00	1328.00	5.18	88.66	131.74	10.26	6.96	15.32	1.55	9.81	307.16	112.76	44.62	6.73	9.30E+06
	D.E.	316.19	322.15	189.31	387.15	1.59	23.96	39.54	2.40	1.98	3.82	0.42	3.82	83.27	28.52	11.65	2.01	3.37E+06
Zacatelco n=10	Media	76.39	624.40	421.20	203.20	0.48	95.37	176.82	13.50	4.60	18.10	2.41	10.08	85.42	64.46	13.73	3.00	1.29E+08
	Min.	20.20	496.00	192.00	108.00	0.00	16.90	79.40	3.44	1.89	7.10	0.14	0.01	54.61	30.18	0.06	0.01	2.30E+05
	Max.	175.00	756.00	572.00	400.00	3.80	214.75	404.04	28.88	10.99	37.62	19.21	24.06	145.62	126.37	24.02	6.43	1.10E+09
	D.E.	41.43	93.25	102.10	85.81	1.21	63.83	97.46	8.63	2.93	9.79	5.92	7.20	27.94	32.91	6.66	2.35	3.64E+08

\*Turb en NTU, \*\* CF=coliformes fecales en NMP/100 mL, ST= sólidos totales, STF= sólidos totales fijos, STV= sólidos totales volátiles, OD= oxígeno disuelto, DBO= demanda bioquímica de oxígeno, DQO= demanda química de oxígeno, NH<sub>3</sub>= nitrógeno como amonio, Norg= nitrógeno orgánico, NT= nitrógeno total, NO<sub>3</sub>= nitrógeno como nitrato, GyA= grasas y aceites, SAAM= sustancias activas al azul de metileno, \*\*\*D.E. sin unidades

está en una microcuenca sin asentamientos humanos, es decir no es agua residual y tuvo los valores más bajos de DBO. El punto de muestreo Atlangatepec se encuentra a dos kilómetros corriente abajo de la cortina de la presa con el mismo nombre, donde hay plantas acuáticas en el cauce del río que introducen oxígeno al agua por fotosíntesis. Estas condiciones pueden favorecer concentraciones de OD mayores a los límites teóricos, como los máximos encontrados de aproximadamente 11.00 mg L<sup>-1</sup>.

En el **cuadro III** se indican los pares de parámetros fisicoquímicos que tuvieron valor de  $r^2 > 0.8$ . El par DBO-DQO mostró valores de  $r^2 > 0.8$  en seis de los doce puntos de muestreo. La  $r^2$  de estos dos parámetros, obtenida con una gráfica elaborada con los datos de todos los puntos de muestreo, es igual a 0.733. Este valor es a su vez el mayor que se encontró de las  $r^2$  de todos los pares posibles de los parámetros considerados; coincide con el valor de 0.741 obtenido por Li *et al.* (2007). Se encontraron valores altos de  $r^2$  en algunos pares y para ciertos puntos de muestreo. Se obtuvo un valor mayor a 0.8 de este estadístico con el par Turb-Cl en Texoloc. Para Cl, ésta es la única relación significativa que se cuantificó por este método y criterio de análisis, lo cual significa que su presencia no tiene relación con los otros parámetros fisicoquímicos. En las muestras de Tlaxco, Xaltocan y Amamax no se encontraron pares de parámetros o casos donde existan valores de  $r^2 > 0.8$ ; en San Benito y Texoloc se encontró un caso, en Atlangatepec y en Muñoz dos casos; en Dos Arroyos, Jardín Botánico, Zacatelco, El Pardo y Trébol se encontraron 3, 4, 5, 7 y 8 casos, respectivamente. Estos dos últimos puntos de muestreo son las salidas de pequeñas microcuencas donde no hay actividad industrial ni agrícola a gran escala. La microcuenca de El Pardo está inalterada y conserva sus condiciones naturales. Por el contrario, en la microcuenca Amamax, donde no se obtuvo ningún valor de  $r^2 > 0.8$ , se concentra la mayor actividad industrial y agrícola, por lo que los compuestos fisicoquímicos presentes tienen diferentes fuentes. Los resultados obtenidos en este trabajo revelan que los compuestos químicos presentes en los puntos de muestreo se relacionan de manera compleja.

Los valores de  $r^2$  de todos los puntos de muestreo, obtenidos al graficar la DQO contra la DBO, se encuentran entre 0.87 en San Benito y 0.40 en Xaltocan. Para las muestras tomadas en el drenaje de San Bernardino Contla (SBC), municipio de Juan Cuamatzi, el valor de  $r^2$  es igual a 1 (**Cuadro IV**). Este mismo valor se obtiene al graficar los datos de DQO contra DBO de diferentes tipos de industrias publicados en la página 319 del libro de Hammer y Hammer (2001). Las líneas

**CUADRO II.** PORCENTAJE DE DATOS MAYORES A LOS LÍMITES ESTABLECIDOS EN LA NOM-001-SEMARNAT-1996 Y EN LOS CE-CCA-001/89

Punto de muestreo	NOM-001-SEMARNAT-1996				CE-CCA-001/89					
	DBO	NT	GyA	CF	Cloruros	NH <sub>3</sub>	OD	SAAM	Sulfatos	Fosfatos
El Pardo	0	0	11	89	0	100	22	22	100	56
Atlangatepec	0	0	13	100	0	100	22	33	100	11
Tlaxco	0	0	20	90	0	100	90	90	100	100
Muñoz	0	0	25	100	0	100	78	56	100	100
Xaltocan	10	0	20	100	0	100	80	80	100	90
San Benito	10	0	30	100	0	100	80	90	100	100
Amamax	0	0	40	100	0	100	70	70	100	80
Dos Arroyos	20	0	50	100	0	100	100	90	100	100
J. Botánico	0	11	11	100	0	100	89	89	100	78
Trébol	0	0	60	100	0	100	30	70	100	70
Texoloc	0	0	11	100	11	100	89	100	100	56
Zacatelco	20	0	40	100	0	100	100	90	100	90

DBO= demanda bioquímica de oxígeno, NT= nitrógeno total, GyA= grasas y aceites, CF= coliformes fecales, NH<sub>3</sub>= nitrógeno como amonio, OD= oxígeno disuelto, SAAM= sustancias activas al azul de metileno,

**CUADRO III.** PARES DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS CON VALOR DE r<sup>2</sup>>0.8

Punto de muestreo	Par de parámetros
San Benito	DBO-DQO
Texoloc	Turb-Cl
Atlangatepec	DBO-DQO, PO <sub>4</sub> -CF
Muñoz	Turb-SO <sub>4</sub> , DBO-PO <sub>4</sub>
Dos Arroyos	DBO-DQO, Turb-DBO, Turb-DQO
J. Botánico	DBO-DQO, OD-NT, OD-DBO, Turb-CF
Zacatelco	DBO-DQO, DQO-NT, STV-DBO, SO <sub>4</sub> -PO <sub>4</sub> , Turb-STV
El Pardo	DBO-DQO, SO <sub>4</sub> -STV, SO <sub>4</sub> -DQO, STV-DQO, STV-GyA, DBO-GyA, DQO-GyA
Trébol	OD-DQO, OD-NT, OD-SAAM, DQO-NT, DQO-SAAM, NT-PO <sub>4</sub> , NT-SAAM, PO <sub>4</sub> -SAAM

DBO= demanda bioquímica de oxígeno, DQO= demanda química de oxígeno, Turb= turbiedad, Cl= cloruros, PO<sub>4</sub>= fosfatos, CF= coliformes fecales, SO<sub>4</sub>= sulfatos, OD= oxígeno disuelto, NT= nitrógeno total, STV= sólidos totales volátiles, GyA= grasas y aceites, SAAM= sustancias activas al azul de metileno

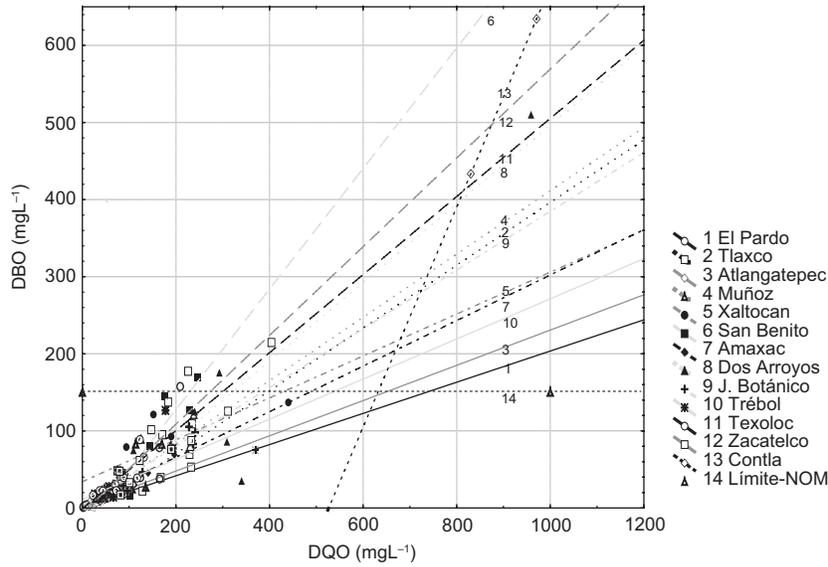
de ajuste de regresión lineal de DQO contra la DBO para cada punto de muestreo se encuentran en la **figura 1**. La línea horizontal indica el límite máximo de la NOM-001-SEMARNAT-1996 para DBO. La línea punteada corresponde a dos muestras tomadas en el punto de descarga del drenaje de SBC. La pendiente de esta línea es igual a 0.8483, la más alta comparada con las otras líneas (**Cuadro IV**) e indica que la materia

**CUADRO IV.** VALORES DE PENDIENTE Y r<sup>2</sup> DE LAS RECTAS DE REGRESIÓN, OBTENIDOS CON LOS DATOS DE DBO Y DQO

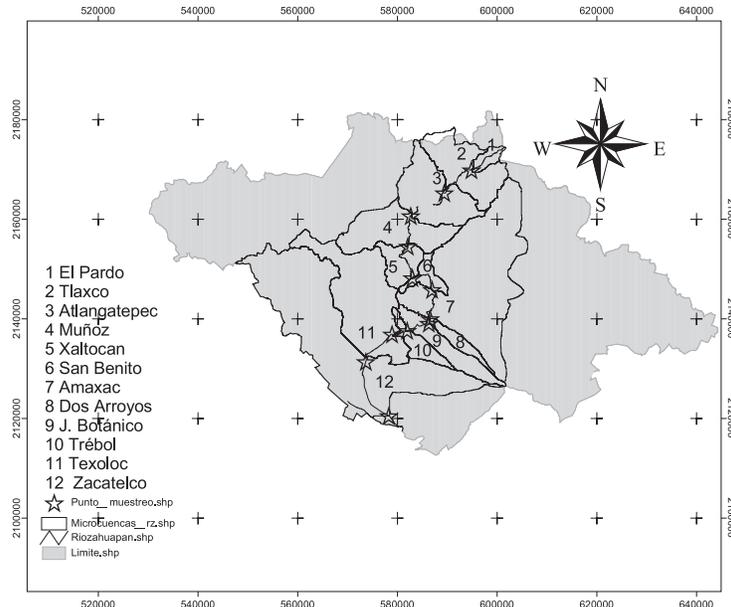
Punto de muestreo	Pendiente	r <sup>2</sup>
El Pardo	0.2022	<b>0.8634</b>
Tlaxco	0.4070	0.7325
Atlangatepec	0.2285	<b>0.8426</b>
Muñoz	0.4104	0.5768
Xaltocan	0.2717	0.3998
San Benito	0.7818	<b>0.8716</b>
Amamax	0.2954	0.7414
Dos Arroyos	0.5099	<b>0.8576</b>
J. Botánico	0.3810	<b>0.8664</b>
Trébol	0.2601	0.5098
Texoloc	0.5064	0.6983
Zacatelco	0.5755	<b>0.7722</b>
Contla	0.8483	<b>1.0000</b>

orgánica presente es en gran medida biodegradable. Una línea de regresión entre la DBO y DQO con pendiente cercana a 1 es teóricamente indicadoras de que la materia presente es de tipo orgánico biodegradable, como ocurre en las aguas residuales crudas de origen municipal, por ejemplo las muestras de SBC. Las líneas de regresión de El Pardo, Atlangatepec y Trébol presentaron las menores pendientes, lo cual indica que la materia orgánica biodegradable es menor o ya ha sido transformada al llegar al punto de muestreo.

Los polígonos de las microcuencas y los doce puntos de muestro se presentan en la **figura 2**. El programa TAS define el área que se encuentra pendiente arriba de un punto dado y un parteaguas cuando esta tendencia cambia pendiente abajo de un punto a otro. Se observa que el parteaguas de la



**Fig. 1.** Relación de la demanda química de oxígeno con la demanda bioquímica de oxígeno



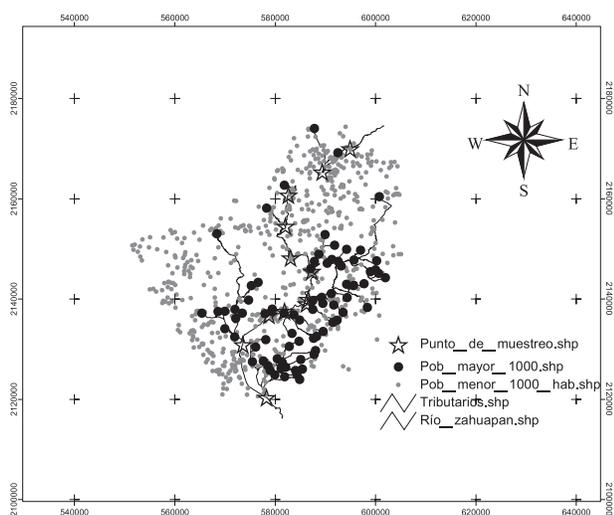
**Fig. 2.** Polígonos de las doce microcuencas y puntos de muestreo

microcuenca de Zacatelco se encuentra más allá del límite político administrativo del estado de Tlaxcala, lo cual no tiene efecto en la contabilización de las localidades pertenecientes a la microcuenca porque las poblaciones están incluidas en el conteo.

En la **figura 3** se presentan los tributarios donde se obtuvieron las muestras de agua y las localidades que tienen conexión hidrológica con los puntos de muestreo. En total hay 295 localidades en la subcuenca del río Zahuapan, donde viven aproximadamente 523 830 personas (59 % de los habitantes del estado de Tlaxcala).

En el **cuadro V** se presenta la agrupación en clases de las localidades y en el **cuadro VI** el número de habitantes pertenecientes a las áreas de captación definidas por los puntos de muestreo. Se observa que predominan las localidades entre 1 y 100 habitantes, con 57 %, en éstas habitan un total de 2923 personas. Las tres clases de localidades con poblaciones entre 5000 y 50 000 representan el 7 %, en ellas habitan 287455 personas.

Las microcuencas de Amaxac, Zacatelco y Texoloc son las que tienen más localidades pequeñas (con menos de 100 habitantes). Las poblaciones que



**Fig. 3.** Tributarios y localidades con poblaciones mayores a mil habitantes

tienen entre cien y mil habitantes representan 16 % y en ellas habitan 23 095 personas. En el grupo de localidades de mil a cinco mil habitantes se asientan 160 898 habitantes; éste es el grupo más poblado de todos. Hay cinco localidades entre 20 000 y 50 000 habitantes, donde en total viven 156 727 personas (33 %). 67 % de la población que habita en el área de influencia de los puntos de muestreo está concentrada en localidades de 1001-5000 y 20001-50 000 habitantes.

Con respecto al número de localidades y puntos de muestreo, se observa en el **cuadro V** que en Amaxac se concentra el mayor porcentaje de localidades (41 %); le siguen Zacatelco y Texoloc, con 20 y 16 %, respectivamente. Los demás puntos de muestreo

tienen porcentajes menores de 10 %. En términos de número de habitantes, en Amaxac se observa el valor más alto, con 161 273 (34 %), seguido de Zacatelco, Jardín Botánico y Texoloc con 129 772 (27 %), 65 549 (14 %) y 43 999 (9 %), respectivamente.

La ciudad de Apizaco descarga sus aguas residuales a los puntos de muestreo San Benito y Amaxac. Por otra parte, la localidad de la cabecera municipal de Contla de Juan Cuamatzi las descarga a otros puntos no considerados en este trabajo. Las 81 localidades con poblaciones mayores a mil habitantes que tienen relación con los puntos de muestreo, suman 449 421 personas, lo que representa 95.3 % de la población considerada (**Fig. 3** y **Cuadro VII**). Los valores subrayados indican que la población de Apizaco es contabilizada en dos puntos de muestreo. El mayor porcentaje de la población de la subcuenca se encuentra a una distancia de 5 a 10 km, conectada hidrológicamente a los puntos de muestreo por medio de barrancos o canales. Al comparar los **cuadros VI** y **VII** se observa que la segregación de las localidades con poblaciones menores a 1000 habitantes no tiene efecto en la distribución de porcentajes de población asentada en las microcuencas. En el **cuadro VII** no se encuentra el número de habitantes de la microcuenca de muestreo Xaltocan, que es menor a 1000 personas. Esta localidad es considerada en este estudio porque su descarga de aguas residuales al río se define por un canal.

La **figura 4** muestra los valores de  $r^2$  obtenidos al graficar la carga de la DBO (masa por unidad de tiempo que fluye en el río) contra la población acumulada que habita a distancias definidas del río Zahuapan. Se puede observar que  $r^2$  alcanza su máximo

**CUADRO V.** LOCALIDADES, EN INTERVALOS POR NÚMERO DE HABITANTES, QUE ESTÁN RELACIONADAS CON LOS PUNTOS DE MUESTREO

Punto de muestreo	Habitantes	Localidades	Clases					
			0-100	101-1000	1001-5000	5001-10000	10001-20,000	20001-50000
Tlaxco	15 621	15	13	0	1	0	1	0
Atlangatepec	1 248	8	7	0	1	0	0	0
Muñoz	1 876	11	9	1	1	0	0	0
Xaltocan	660	1	0	1	0	0	0	0
San Benito	58 709	3	0	0	2	0	0	1
Amaxac	161 273	120	74	20	18	6	1	1
Dos Arroyos	34 255	11	2	5	3	0	0	1
J. Botánico	65 549	16	9	0	6	0	0	1
Trébol	10 868	5	1	1	2	1	0	0
Texoloc	43 999	47	23	12	10	2	0	0
Zacatelco	129 772	58	30	6	17	1	3	1
Total	523 830	295	168	46	61	10	5	5
Porcentaje	100	100	57	16	21	3	2	2

**CUADRO VI. HABITANTES DE ACUERDO CON EL TAMAÑO DE LAS LOCALIDADES QUE SE ENCUENTRAN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO ZAHUAPAN**

Punto de muestreo	Clases por número de habitantes						Total
	0-100	101-1000	1001-5000	5001-10000	10001-20000	20001-50000	
Tlaxco	226	0	2237	0	13 158	0	15 621
Atlangatepec	69	0	1 179	0	0	0	1 248
Muñoz	134	574	1 168	0	0	0	1 876
Xaltocan	0	660	0	0	0	0	660
San Benito	0	0	9 250	0	0	49 459	58 709
Amamax	1475	9 233	48 526	39 509	13 071	49 459	161 273
Dos Arroyos	13	2 529	6 257	0	0	25 456	34 255
J. Botánico	121	0	18 652	0	0	46 776	65 549
Trébol	2	849	3 494	6 523	0	0	10 868
Texoloc	538	5 736	25 329	12 396	0	0	43 999
Zacatelco	345	3 514	44 806	6 497	39 574	35 036	129 772
Total	2923	23 095	160 898	64 925	65 803	156 727	474 371
Porcentaje	0.6	4.9	33.9	13.7	13.9	33.0	100

**CUADRO VII. NÚMERO DE HABITANTES QUE VIVEN A DIFERENTES DISTANCIAS DEL RÍO ZAHUAPAN**

Punto de muestreo	Distancia al río en kilómetros								Población por microcuenca	Porcentaje de población por microcuenca
	<1	1-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30<		
Tlaxco	0	0	15 395	0	0	0	0	0	15 395	3.1
Atlangatepec	0	1 179	0	0	0	0	0	0	1 179	0.2
Muñoz	0	0	1 168	0	0	0	0	0	1 168	0.2
Xaltocan	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
San Benito	4908	<u>53 801</u>	0	0	0	0	0	0	58 709	11.8
Amamax	7314	6610	4892	22 336	83 523	23 698	8305	1 201	157 879	31.7
Dos Arroyos	0	25 456	4 342	0	0	0	0	0	29 798	6.0
J. Botánico	2000	4565	58 863	0	0	0	0	0	65 428	13.1
Trébol	0	10 017	0	0	0	0	0	0	10 017	2.0
Texoloc	0	9 045	11 464	8 469	4 339	0	4 408	0	37 725	7.6
Zacatelco	0	0	65 904	25 753	29 806	0	0	0	121 463	24.4
Población por distancia al río	14 222	110 673	162 028	56 558	117 668	23 698	12 713	1 201	498 761	100
Porcentaje de población por distancia al río	2.9	22.2	32.5	11.3	23.6	4.8	2.5	0.2	100	

Los valores subrayados indican que la población de Apizaco es contabilizada en las microcuencas de San Benito y Amamax

valor cuando se relaciona la carga de la DBO con la población que habita a 20 km de la línea del cauce del río. Esto significa que la carga de la DBO cuantificada en este trabajo se explica por la población que habita a esta distancia del río. Dicho de otra manera, la carga de DBO del río se debe principalmente a los habitantes que viven a una distancia de 20 km del río. Esto es relevante porque con este resultado se detecta el punto palanca que hay que accionar para el saneamiento del río Zahuapan. Las acciones que se realicen en localidades con poblaciones mayores a 1000 habitantes dentro de esta área de influencia tendrán un mayor efecto sobre el saneamiento del río.

## CONCLUSIONES

En el 100 % de las muestras, las concentraciones de nitrógeno amoniacal, sulfatos y coliformes fecales, evaluadas en este trabajo sobrepasaron el límite establecido en los criterios ecológicos de calidad del agua. El OD, SAAM y fosfatos lo excedieron en un 70 %, mientras que la DBO, NT y cloruros presentaron porcentajes menores a 5 %. La correlación entre la DBO y la DQO mostró los valores más altos de  $r^2$ ; de manera general se obtuvo un valor de 0.733. En las microcuencas donde no hay actividad industrial ni agrícola a gran escala, se encontró el mayor número

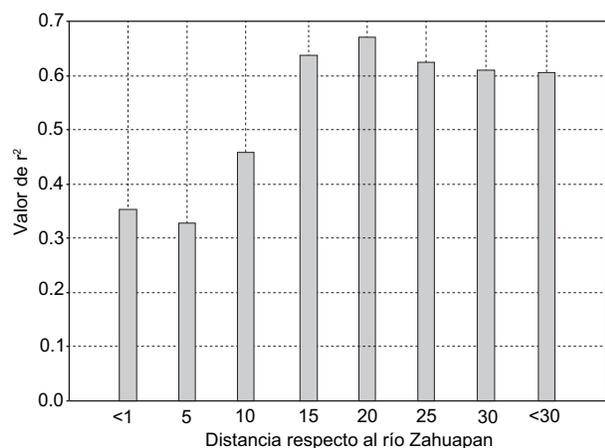


Fig. 4. Valores de  $r^2$  obtenidos con relación a la carga de DBO y la población asentada a los alrededores del Río Zahuapan.

de coeficientes de determinación  $> 0.8$  entre pares de parámetros fisicoquímicos. Por el contrario, en las microcuencas con actividad industrial y agrícola no se encontraron coeficientes de determinación con valor mayor a 0.8 entre los parámetros fisicoquímicos. En total hay 295 localidades en la subcuenca del río Zahuapan, con una población aproximada de 523 830 personas, que representa 59 % de los habitantes del estado de Tlaxcala. 67 % de la población asentada en el área de influencia de los puntos de muestreo está concentrada en localidades de 1001-5000 y de 20001-50 000 habitantes.

El mayor porcentaje de la población de la subcuenca se encuentra a una distancia entre 5 y 10 km, conectada hidrológicamente a los puntos de muestreo por medio de barrancos o canales. Se encontró que la  $r^2$  alcanza su máximo valor cuando se relaciona la carga al gasto de la DBO con la población que habita hasta 20 km de la línea del cauce del río. Esto significa que la carga de la DBO cuantificado en este trabajo es explicado por la población que habita a esta distancia del río.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones y personas por su contribución en la generación de información utilizada en el presente trabajo: al Fondo Mixto CONACyT-Gobierno de Estado de Tlaxcala por el apoyo económico para la realización del trabajo en el río mediante el proyecto "Análisis y simulación espacio-temporal de los contaminantes del Río Zahuapan, Tlaxcala", clave: TLAX-2004-C01-27. Se agradece particularmente a la Ing. Blanca Soto Barbosa y al Q. Víctor León

Fuentes, personal del Laboratorio de Análisis de Agua, por su apoyo en la determinación analítica de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua. Al Ing. Germán Parra, Delegado de la SEMARNAT en Tlaxcala por su apoyo con el medio de transporte para el trabajo en el río. Especial agradecimiento a los alumnos de las licenciaturas en Ciencias Ambientales y Biología de la Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, por su apoyo invaluable en la realización del trabajo en el río Zahuapan. Así como también a los revisores, cuyas sugerencias mejoraron el contenido de este manuscrito.

### REFERENCIAS

- Alexander R.B., Smith R., Schwarz G., Boyer E., Nolan J.V. y Brakebill J.W. (2008). Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin. *Environ. Sci. Technol.* 42, 822-830.
- Chen H.W. y Chang N.B. (1998). Water pollution control in the river basin by fuzzy genetic algorithm-based multiobjective programming modeling. *Water Sci. Technol.* 37, 55-63.
- CONAGUA (2008). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua, D.F., 228 p.
- Dimitrova I., Kosturkov J. y Vatrlova A. (1998). Industrial surface water pollution in the region of Devnya, Bulgaria. *Water Sci. Technol.* 37, 45-53.
- DOCE (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. El Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea, Luxemburgo, 72 p.
- SEDUE (1989). CE-CCA-001/89 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial de la Federación 13 de diciembre de 1989.
- Hammer M.J. y Hammer M.J. Jr. (2001). *Water and wastewater technology*. Prentice Hall, Upper Saddle River New Jersey, 536 p.
- Hayakawa A., Shimizu M., Woli K.P., Kuramochi K. y Hatano R. (2006). Evaluating stream water quality through land use analysis in two grassland catchments: impact of wetlands on stream nitrogen concentration. *J. Environ. Qual.* 35, 617-627.
- INEGI (1999a). Ortofoto digital. Fuente: fotografías aéreas escala 1:75,000 de mayo de 1999. Proyección: UTM. Datum: ITRF92. Elipsoide: GRS 80. Dimensiones del pixel X,Y: 1.5 metros. Productos geográficos básicos digitales. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.

- INEGI (1999b). Estratificación de datos en formato DXF de los conjuntos de datos vectoriales. Carta topográfica, escala 1:50,000. Versión 4. Productos geográficos básicos digitales. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- INEGI (1999c). Conjunto de datos vectoriales. Localidades del Estado de Tlaxcala. Productos geográficos básicos digitales. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- INEGI (2005). Censo General de Población y Vivienda 2005. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México.
- Johnson H.O., Gupta S.C., Vecchia A.V. y Zvomuya F. (2009). Assessment of water quality trends in the Minnesota River using non-parametric and parametric methods. *J. Environ. Qual.* 38, 1018-1030.
- Kingsbury J.A., Delzer G.C. y Hopple J.A. (2008). Scientific investigations report 2008-5208. Anthropogenic organic compounds in source water of nine community water systems that withdraw from streams, 2002-05. U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior. Reporte técnico. Reston, Virginia. 66 p.
- Li R., Dong M., Zhao Y., Zhang L., Q. Cui Q. y He W. (2007). Assessment of water quality and identification of pollution sources of Plateau Lakes in Yunnan (China). *J. Environ. Qual.* 36, 291-297.
- Lindsay J. (2005). *Terrestrial Analysis Systems v. 2.0.9. Geographical Information System.* Número de Serie 45369ABCDEF1731. Manchester University.
- Martínez M.M., Gutiérrez O.C., Reyes S.J.R., Mata A.I. y Sánchez D.L.F. (2007). Estudio hidrogeológico de la porción alta del acuífero Alto Atoyac (Estado de Tlaxcala). Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Coordinación de Hidrología, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. SEMARNAT. Reporte técnico. Jiutepec, Morelos. 95 p.
- McDonald J.L., Hartel P.G., Gentit L.C., Belcher C.N., Gates K.W., Rodgers K., Fisher J.A., Smith K.A. y Payne K.A. (2006). Identifying sources of fecal contamination inexpensively with targeted sampling and bacterial source tracking. *J. Environ. Qual.* 35, 889-897.
- Nagy Zs. y Jung A. (2005). A case study of the anthropogenic impact on the catchment of Mogyoród-brook, Hungary. *Phys. Chem. Earth* 30, 588-597.
- Noss R.R. (1984). The U.S. approach to water pollution control. *Environ. Intern.* 10, 217-223.
- Rivera-Vázquez R., Palacios-Vélez O.I., Chávez M.J., Belmont M.A., Nikolski-Gavrilov I., de la Isla-De Bauer M.L., Guzmán-Quintero A., Terrazas-Onofre L. y Carrillo-González R. (2007). Contaminación por coliformes y helmintos en los ríos Texcoco, Chapingo y San Bernardino tributarios de la parte oriental de la cuenca del Valle de México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 23, 69-77.
- SECOFI (1980). NMX-AA-003-1980. Aguas residuales: muestreo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Diario Oficial de la Federación. 25 de marzo, 1980.
- SEMARNAT (2003). NOM-001-ECOL-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, México. 23 de abril, 2003.