

# RELACIÓN ENTRE EL NITRÓGENO Y LAS MICROCUENCAS DEL RÍO ZAHUAPAN, MÉXICO

• Hipólito Muñoz-Nava\* • Juan Suárez-Sánchez • Andrea Vera-Reyes •  
*Universidad Autónoma de Tlaxcala, México*

\*Autor de correspondencia

• Jürgen Baumann •  
*Consultor*

• Miguel Francisco Carreón-Coca • Raúl Gehiel Montealegre-Muñoz •  
*Universidad Autónoma de Tlaxcala, México*

## Resumen

Tanto la agricultura como las descargas de aguas residuales son fuentes importantes de nitrógeno en las corrientes de agua superficiales. El objetivo en este trabajo es describir de forma espacial y temporal las concentraciones de especies de nitrógeno en el río Zahuapan y sus relaciones con algunos atributos de las microcuencas, como área, pendiente, cubierta vegetal, agricultura, erosión, población y precipitación pluvial. Con el programa TAS se definieron los polígonos de las microcuencas del río. Los resultados muestran que las concentraciones de las especies de nitrógeno disminuyen en las microcuencas que se encuentran en las cercanías de la presa de Atlangatepec. De manera temporal, las concentraciones tuvieron su mayor valor en los años de 2001 y 2002. Las concentraciones de NT, NTK, N-NH<sub>3</sub> y N<sub>org</sub> aumentan en los meses de estiaje. Por otro lado, las concentraciones de N-NO<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub> disminuyeron en esta temporada del año. La relación entre las concentraciones y la precipitación mensual resultó tener el mayor número de coeficientes de correlación significativos que los realizados con la precipitación diaria. Los coeficientes de correlación entre las especies de nitrógeno fueron significativos a un nivel de 0.05. El análisis de regresión múltiple de la forma  $N-NO_3 = A_0 + A_1*NT + A_2*N-NH_3 + A_3*N_{org}$  mostró coeficientes mayores que 0.5 en nueve de las doce microcuencas. Se concluye que la presa de Atlangatepec juega un papel en las concentraciones del nitrógeno en el río Zahuapan.

**Palabras clave:** nitrógeno, río Zahuapan, microcuencas.

## Introducción

El ser humano ha impactado el ciclo del nitrógeno debido a que el exceso de fertilizante nitrogenado que se emplea en la agricultura es transportado a los cuerpos de agua o se infiltra a las aguas subterráneas. Además, las aguas residuales sin tratamiento contienen nitrógeno y son descargadas a ríos o embalses. El agua residual municipal cruda puede tener concentraciones promedio de nitrógeno total

de 35 mgL<sup>-1</sup> (Hammer y Hammer, 2001). El río Zahuapan (Tlaxcala, México) ha sido el receptor de los escurrimientos y las descargas de agua residual cruda o tratada de los centros de población de la subcuenca, por lo que resulta importante saber cómo han cambiado con el tiempo las concentraciones de las formas químicas del nitrógeno en el río Zahuapan y cómo tales concentraciones están relacionadas con las fuentes. La relación entre las concentraciones de nitrógeno en los cuerpos

de agua y las fuentes varían de acuerdo con las condiciones ambientales, pero las rutas del ciclo del nitrógeno son las mismas. Por eso los estudios realizados en otras latitudes son de gran utilidad, pues muestran las relaciones entre estas variables. Por ejemplo, Hayakawa *et al.* (2006) encontraron una correlación positiva entre las concentraciones de nitrato en una corriente de agua al este de Japón y el área que se encuentra en la parte alta de la cuenca de drenaje, aumentando las concentraciones en cuencas con uso de suelo urbano, comparado con aquellas donde hay humedales naturales y bosques. Una relación específica la proporcionan Tesoreiro *et al.* (2009), quienes señalan que el agua subterránea es la fuente principal de nitrato en cinco corrientes superficiales de Estados Unidos. Puckett y Hughes (2005) reportan una relación entre las concentraciones de nitrógeno y las precipitaciones pluviales, al encontrar que las concentraciones de nitratos y amonio, en un terreno de cultivo sobre un acuífero superficial en Carolina del Sur, Estados Unidos, aumentan en periodos de mayor flujo de la corriente. En cuanto a una estimación cuantitativa del aporte de nitrógeno, los cultivos de maíz y soya son los mayores contribuyentes, con 52%, seguido de las deposiciones atmosféricas, con 16%, en las cuencas del Mississippi y Atchafalaya (Alexander *et al.*, 2008). En Inglaterra y Gales, el aporte de la agricultura es de 60% y de las descargas de aguas residuales de 32% (Burt *et al.*, 2011). En particular para México, se han realizado estudios que relacionan el nitrógeno con fuentes puntuales y difusas. Izurieta *et al.* (2002), empleando un modelo de funciones de carga, estimaron en la cuenca del lago Cuitzeo, un porcentaje de contribución de nitrógeno por fuentes puntuales y difusas de 66.6 y 33.4%, respectivamente. En un estudio realizado por Silva *et al.* (2002) en el río Nexapa, encontraron que los sitios más contaminados están donde se cultivan flores y hortalizas, pues se aplican mayores cantidades de agroquímicos y se riega con agua residual.

Las concentraciones de las formas químicas del nitrógeno en los ríos varían de acuerdo con las condiciones específicas de cada caso. Por ejemplo, para el río Texcoco, la concentración promedio de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) fue igual a  $0.56 \text{ mgL}^{-1}$  ( $0.13$  como  $\text{N-NO}_3$ ) (Navarro-Garza y Pérez-Olvera, 2005) y de nitrógeno total de  $21$  a  $60 \text{ mgL}^{-1}$  (Guzmán *et al.*, 2007). López *et al.* (2007), en un estudio realizado en el cauce principal de la cuenca Lerma-Chapala, reportan valores de  $\text{N-NH}_3$  y  $\text{N-NO}_3$  de  $3.97$  y  $12.92 \text{ mgL}^{-1}$ , respectivamente. La concentración de  $\text{N-NO}_3$  en el Lerma-Chapala se aproxima al reportado por Burt *et al.* (2011), para los ríos de Inglaterra y Gales, donde se alcanzan valores de  $10 \text{ mgL}^{-1}$ . Concentraciones menores a las del río Texcoco fueron reportados por Santiago-Fragoso y Sandoval-Manrique (2001) para el río Cuautla, quienes encontraron valores de  $0.01$  a  $0.13 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{N-NH}_3$ , de  $0.005$  a  $0.1 \text{ mgL}^{-1}$  de  $\text{N}_{\text{org}}$  y de  $0.02$  a  $0.23 \text{ mgL}^{-1}$  de NT.

Las concentraciones de nitrógeno en los ríos tienen variaciones temporales. Xia *et al.* (2002) encontraron que el  $\text{N-NH}_4$  y el NIT mostraron un acelerado aumento a través de los años 1980, 1990, 1997 y 1999, atribuyéndolo a los incrementos de la descarga de agua residual y a la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Además, las concentraciones de  $\text{N-NH}_4$ , NIT y  $\text{N-NO}_3$  son mayores en la época de sequía que en la de lluvias. En el río Amarillo (China), la concentración de  $\text{N-NH}_4$  pasó de  $0.04$  en 1980 a  $0.36 \text{ mgL}^{-1}$  en 1999, y la del NIT pasó de  $1.3$  en 1990 a  $4.64 \text{ mgL}^{-1}$  en 1999. Las acciones que se tomen para reducir las concentraciones de nitrógeno tendrán su efecto a mediano y largo plazos. Así lo demuestra el trabajo de Burt *et al.* (2011), quienes señalan que las concentraciones de nitrato en algunas corrientes de agua de cuencas dominadas por el agua subterránea, por ejemplo el río Frome (Reino Unido), siguen aumentando, aunque ya se han tomado medidas de control de descargas de aguas residuales a los ríos. Con base en lo anterior y para tener una idea de lo que ha pasado respecto a las concentraciones de nitrógeno en el río Zahuapan (México), es muy importante

describir espacial y temporalmente, de 1997 a 2007, las concentraciones de las especies de nitrógeno (total, orgánico, amoniacal y nitratos) de la corriente de este río, y su relación con algunos atributos de las microcuencas, población y precipitación pluvial.

## Metodología

La cuenca del río Balsas pertenece a la región hidrológica RH18 de la república mexicana (Conagua, 2010). La cuenca del río Balsas está dividida en tres subregiones hidrológicas: a) cuenca del Alto Balsas, b) cuenca del río Cutzamala y el Medio Balsas, y c) cuenca del Bajo Balsas. La cuenca del Alto Balsas o de los ríos Atoyac y Mixteco se subdivide en las siguientes subcuencas: Las Cerradas Orientales, Alto Atoyac, Bajo Atoyac, Nexapa, Amacuzac, Tlapaneco y Mixteco (Toledo, 2003). La 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 con los límites convergentes de placas (Martínez *et al.*, 2007). En la subcuenca del Alto Atoyac hay escurrimientos que forman dos corrientes principales: el del río Atoyac y el del río Zahuapan el segundo es considerado afluente del primero. Este estudio se realizó en el río Zahuapan, estado de Tlaxcala (figura 1) y su área de captación es mencionada en este trabajo como subcuenca. La corriente del río Zahuapan se forma de los escurrimientos de la sierra de Tlaxco, Bloque de Tlaxcala y de la Malintzin. En la sierra de Tlaxco nace el río Zahuapan y se forma la corriente El Fondón. Del Bloque de Tlaxcala se forman las corrientes Totolac y Rojano, y de la Malintzin se forman las corrientes Amomoloc, Atenco, Grande y Viejo. Al margen del río hay tres manantiales en los municipios de Tlaxco, Amacuzac y Apetatitlán (observación directa realizada en campo). Se desconoce cuál es la aportación de estos manantiales al caudal del río. En la temporada de sequía, un porcentaje importante del caudal es aportado por la presa de Atlangatepec y por

las descargas de aguas residuales. Hay siete represas que interrumpen la corriente del río y está asentado un total de mil localidades en la subcuenca (estimación hecha por los autores). El río Zahuapan fluye de norte a sur y está dividido en dos segmentos por la presa de Atlangatepec (figura 1). El segmento que descarga a la presa tiene una longitud de 23 km (segmento 1); la del que se une al río Atoyac es de 75 km (segmento 2). La pendiente media del río es de 0.011 (estimación hecha por los autores). En la subcuenca del río Zahuapan hay un mosaico de varios tipos de suelo. Los que más área cubren son los de tipo fluvisol, regosol, cambisol, vertisol, feozem, litosol y andosol (Werner 1988). 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 humana se concentra en el centro-sur de la subcuenca, con densidades poblacionales en algunos municipios mayores a 1 000 hab km<sup>-2</sup> (estimación de los autores).

Se utilizaron cuatro fuentes de información relacionada con la concentración de especies de nitrógeno en el río Zahuapan. En total se recopilaron 1 782 datos de nitrógeno orgánico ( $N_{org}$ ), nitrógeno como amoníaco ( $N-NH_3$ ), nitrógeno como nitrito ( $N-NO_2$ ), nitrógeno como nitrato ( $N-NO_3$ ), nitrógeno total Kjeldahl (NTK) y nitrógeno total (NT). El NTK es la suma de  $N_{org}$  y  $N-NH_3$ , y el NT es la suma de NTK,  $N-NO_3$  y  $N-NO_2$ . Los datos de concentración de nitrógeno más antiguos son de 1978 (Sedue, 1985). En ese trabajo se reportan 14 datos de concentración de NTK, para siete puntos de muestreo distribuidos en todo el río. Otros 175 datos registrados en 1997, 35 para cada uno de las siguientes especies:  $N_{org}$ ,  $N-NH_3$ ,  $N-NO_3$ , NTK y NT fueron publicados en un estudio preliminar del río Zahuapan, realizado por la Coordinación General de Ecología del Estado de Tlaxcala (CGE, 1997). En dicho estudio se hizo el muestreo del agua de la corriente del río en 13 puntos, de marzo a agosto de 1997. Esos

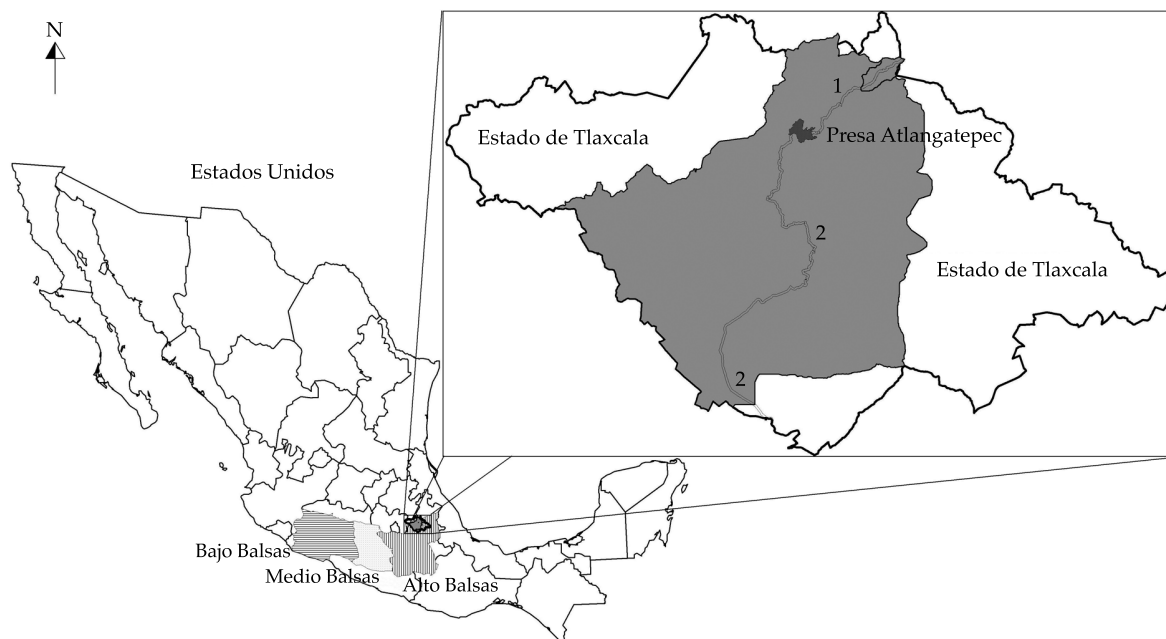


Figura 1. Localización del área de estudio. Las números 1 y 2 indican los segmentos en los que está dividido el río Zahuapan por la presa de Atlangatepec.

13 puntos de muestreo abarcaron un segmento de 39 km en la parte sur del río Zahuapan. La tercera fuente de información fue la Comisión Nacional del Agua, de esta dependencia se obtuvieron 503 datos de concentración de cuatro especies de nitrógeno: 54 de  $N_{org}$ , 63 de  $N-NH_3$ , 142 de  $N-NO_2$ , 140 de  $N-NO_3$ , 54 de NTK y 50 datos de NT, para los años de 1999 a 2007. Estos datos corresponden a tres puntos de muestreo localizados en el norte, centro y sur del río, que se encuentran en la Red Nacional de Monitoreo de esta misma dependencia. La cuarta fuente de datos fue un proyecto de investigación desarrollado por la Universidad Autónoma de Tlaxcala, financiado por SIZA Conacyt (Clave de Registro TLAX-2004-C01-27). En ese estudio se llevaron a cabo muestreos mensuales (por los autores) de septiembre de 2006 a agosto de 2007, en 22 puntos del río Zahuapan. Los puntos de muestreo se seleccionaron considerando los principales tributarios del río. Se obtuvieron en total 1 090 datos de concentración de  $N_{org}$ ,  $N-NH_3$ ,  $N-NO_3$ , NTK y NT, cada una de estas

especies tuvo 218 datos. Las determinaciones analíticas de las formas de nitrógeno fueron hechas por instituciones oficiales de acuerdo con las normas mexicanas vigentes en esos momentos. Aunque se han hecho enmiendas a las normas, éstas no han modificado los principios químicos de determinación, por lo que los datos aquí utilizados pueden considerarse comparables entre sí. Más aún, la información de la primera, segunda y cuarta fuente fue generada por el Laboratorio de lo que hoy es la Coordinación General de Ecología del Gobierno del Estado de Tlaxcala.

El cálculo de los atributos: área, pendiente, porcentajes del área con vegetación natural (comprende varios tipos de bosques, al igual que chaparral y pastizales), agricultura y áreas erosionadas, así como densidad de población en cada microcuenca se realizó de la siguiente manera: las capas de las curvas de nivel a 10 m (INEGI, 1999), que cubren el estado de Tlaxcala, se procesaron en ArcMap™ versión 9.3 (ESRI®, 2008) para generar el modelo digital

de elevación del tipo TIN (*Triangulated Irregular Network*). El programa TAS (*Terrain Analysis System*) versión 2.0.9 (Lindsay, 2005), al ser alimentado con el modelo digital de elevación y los puntos de descarga, produjo los grid's, los cuales se procesaron en *ArcMap*<sup>TM</sup>, para generar los polígonos de las microcuencas (figura 2). En *ArcMap*<sup>TM</sup>, los polígonos de los atributos publicados en mapas digitales por INEGI (1995) para el estado de Tlaxcala fueron cortados por los polígonos de las microcuencas, para finalmente calcular las áreas con este mismo programa. Se calculó la tasa de la densidad de población en un nivel de microcuenca, para el lapso de 1990 a 2010, mediante regresiones lineales. Para ello se utilizaron los censos y conteos de población del INEGI de 1995 a 2010 (INEGI, 2011a-d).

Las concentraciones de las especies químicas de nitrógeno se analizaron en el nivel de punto de muestreo y de microcuenca (agrupando los puntos de muestreo que fueron incluidos en los polígonos de los parteaguas, es decir, que

pertenecen a una microcuenca). Se graficaron las concentraciones de NT, NTK, N-NH<sub>3</sub>, N<sub>org</sub>, N-NO<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub> contra los años de 1978 a 2007, para visualizar las tendencias en ese periodo en la subcuenca del río Zahuapan. Se realizó estadística descriptiva, que incluye la media, mediana, moda, mínimo, máximo, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, varianza y Kurtosis, empleando el programa *Statistica* versión 8.0 (StatSoft, Inc., 2007). Se determinaron las tendencias de las concentraciones de NT, NTK, N-NH<sub>3</sub> y N<sub>org</sub> en el nivel de microcuencas. Con base en que en el altiplano mexicano se definen con claridad dos épocas del año, una de lluvias y otra de sequía, se agruparon los datos de las concentraciones de nitrógeno (NT, NTK, N-NH<sub>3</sub>, N<sub>org</sub>, N-NO<sub>3</sub> y N-NO<sub>2</sub>) con este criterio. Se utilizó la definición de meses de sequía y de lluvias publicada por la Conagua (2011). En los años donde hubo datos, la época de sequía se formó con los meses de los años subsecuentes (la época de sequía en el altiplano es de noviembre a mayo).

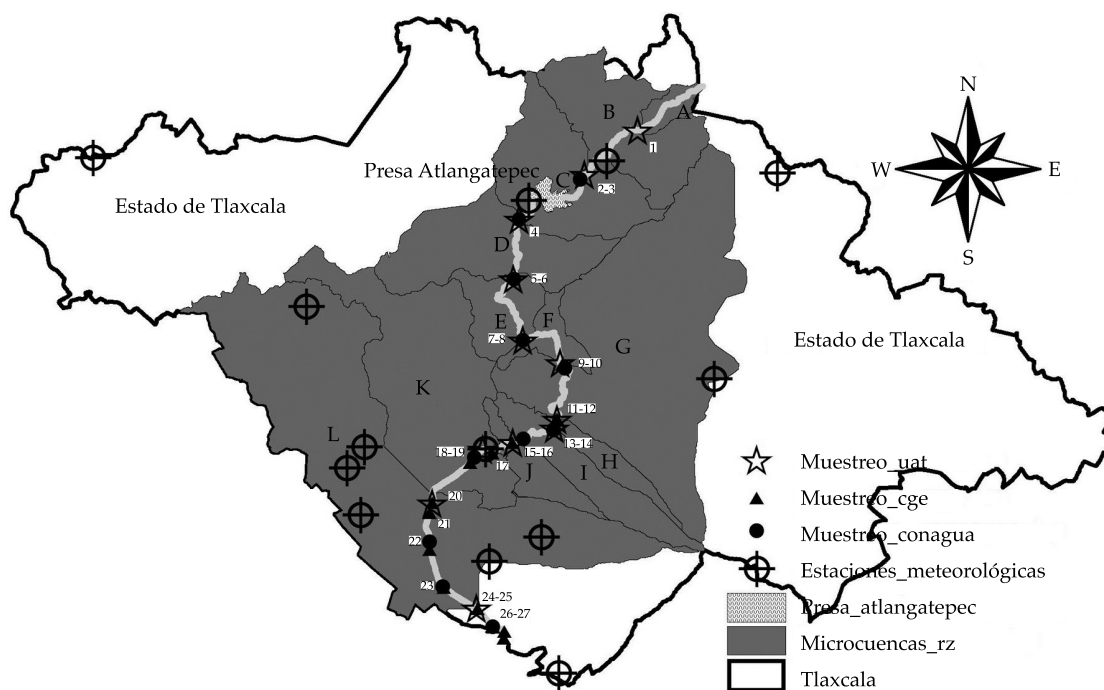


Figura 2. Microcuencas del río Zahuapan. Los números indican los puntos de muestreo.



Se calcularon los coeficientes de correlación relacionando las concentraciones de las especies químicas de nitrógeno de los años 2006 y 2007 en siete puntos de muestreo contra los datos de precipitación pluvial mensual y diario; para este último caso, la registrada un día antes de la fecha de muestreo en siete estaciones meteorológicas. También se determinaron coeficientes de correlación formando pares de datos entre las concentraciones de nitrógeno en el nivel de punto de muestreo y de microcuenca. Para determinar el nivel de significancia de los valores de  $R$  (coeficiente de correlación), se utilizó la prueba de  $t$  (McBean y Rovers, 1998). En el nivel de microcuenca se realizaron análisis de regresión múltiple de las concentraciones de nitrógeno de las formas  $N-NO_3 = A_0 + A_1 * N-NH_3 + A_2 * N_{org}$  y  $N-NO_3 = A_0 + A_1 * NT + A_2 * N-NH_3 + A_3 * N_{org}$ , donde los coeficientes  $A_i$  son los valores de los coeficientes de regresión múltiple lineal.

## Resultados

El resultado de la ejecución del programa TAS fueron los polígonos de las microcuencas etiquetadas con las letras de A a L (figura 2). Estos polígonos son los límites de los parteaguas de las doce microcuencas. Los puntos de muestreo están enumerados del 1 al 27, empezando en la parte alta y terminando en la parte baja de la subcuenca. Algunos puntos de muestreo, principalmente de años anteriores a 2006-2007, quedaron dentro de los polígonos de las microcuencas H, K y L. El área, la pendiente, los porcentajes del área con vegetación natural, con agricultura y erosionadas, así como la densidad de población de las microcuencas del río Zahuapan, se encuentran en el cuadro 1. Las áreas van de 18.1 a 529.4 km<sup>2</sup>. La más pequeña fue la microcuenca A y la más grande la L. El área total de las doce microcuencas representó el 48% de la superficie del estado de Tlaxcala. La microcuenca A, donde se encuentra el nacimiento del río, resultó tener la mayor pendiente, con un valor de 11.5%. La microcuenca D, que se encuentra después

de la presa de Atlangatepec, tuvo la menor pendiente, con 2.2%. Respecto al porcentaje del área cubierta por vegetación natural (la vegetación natural comprende varios tipos de bosques, así como chaparral y pastizales), la microcuenca A tuvo la mayor cobertura, con un porcentaje de 92.1%. Las microcuencas E y F tuvieron una cubierta vegetal natural que no alcanza el 0.01% de su superficie. En el nivel de subcuenca, la del río Zahuapan tuvo un porcentaje de cubierta vegetal igual a 30.5%. En relación con el porcentaje del área dedicada a la agricultura, la microcuenca D tuvo el porcentaje más alto, 92.2%, seguida de H, F, J y C. Por subcuenca, el porcentaje del área dedicada a la agricultura tuvo un valor de 61.2%. La microcuenca E sobresalió por haber tenido el mayor porcentaje de área erosionada con 31.1%; por otro lado, la microcuenca A tuvo solamente 0.5%. La densidad de población promedio, calculada con los censos y conteos de 1990 a 2010, fue de 307.2 hab·km<sup>-2</sup> en la subcuenca. Las microcuencas I, J y H tuvieron las mayores densidades de población promedio, alcanzando en este lapso valores de 1 153.8, 964.4 y 734.6 hab·km<sup>-2</sup>, respectivamente. Con datos de población del censo de 2010, las densidades de estas mismas microcuencas alcanzaron valores de 1 422.7, 1 721.7 y 902.13 hab·km<sup>-2</sup>. Las pendientes de las regresiones lineales de las densidades de población contra el tiempo indican que estas tres microcuencas tuvieron las mayores tasas de incremento de densidad de población, con valores de 28.9, 74.0 y 16.0 hab·km<sup>-2</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente, en el periodo comprendido de 1995 a 2010.

Respecto a las concentraciones de las especies de nitrógeno en las microcuencas (figura 3a), las líneas de las tendencias de las concentraciones de NT, NTK, N-NH<sub>3</sub> y N<sub>org</sub> muestran que la microcuenca A tuvo los menores promedios, sigue un incremento en la microcuenca B, y una disminución en la C y D. A partir de esta última microcuenca hubo un aumento sostenido hasta la microcuenca L, que es donde se encuentra la salida del río de la subcuenca. Las concentraciones en la

Cuadro 1. Concentraciones de las especies de nitrógeno y atributos de las microcuencas del río Zahuapan.

Micro-cuenca	Punto de muestreo	Área (km <sup>2</sup> )	T (km <sup>2</sup> )	S (%)	W* (%)	X (%)	Y (%)	Z*** (hab·km <sup>-2</sup> )	NT (mgL <sup>-1</sup> )	NTK (mgL <sup>-1</sup> )	N <sub>org</sub> (mgL <sup>-1</sup> )	N-NH <sub>3</sub> (mgL <sup>-1</sup> )	N-NO <sub>3</sub> (mgL <sup>-1</sup> )
A	1	18.1	18.1	11.5	92.1	7.4	0.5	0.45	2.33	2.14	1.47	0.67	0.20
B	2-3	133.4	151.1	8.6	33.3	52.5	14.2	139.8	8.31	8.06	3.31	4.76	0.24
C	4	154.4	305.9	4.2	16.6	70.6	12.8	24.4	5.43	4.96	2.79	2.71	0.36
D	5-6	144.4	450.3	2.2	3.7	92.2	4.1	53.2	4.32	4.08	1.88	2.20	0.23
E	7-8	56.3	506.6	3.2	0.0	68.9	31.1	54.2	5.49	5.09	2.50	2.59	0.40
F	9-10	30.8	537.4	2.9	0.0	82.7	17.3	405.0	7.66	6.77	2.67	4.53	0.44
G	11-12	456.0	993.4	4.1	18.5	68.7	12.8	333.4	8.20	7.44	1.91	6.02	0.26
H	13-14	27.6	1 021.0	3.3	7.2	86.5	6.3	734.6	9.34	9.05	2.16	6.89	0.30
I	15-16	76.4	1 097.4	6.7	44.5	51.5	3.6	1 153.8	8.41	7.90	2.73	5.17	0.51
J	17-18-19	40.2	1 137.6	4.3	14.5	76.0	9.5	964.4	10.47	9.75	3.95	6.23	0.43
K	20-21	265.4	1 403.0	7.2	27.3	65.3	7.4	380.9	8.27	8.07	2.94	5.12	0.20
L	22-23-24	529.4**	1 942.4	7.3	58.4	40.5	1.1	268.5	11.50	10.13	3.65	7.60	0.26
<b>Subcuenca</b>		<b>1 914.3</b>		<b>-</b>	<b>30.5</b>	<b>61.2</b>	<b>8.35</b>	<b>307.2</b>	<b>7.48</b>	<b>6.95</b>	<b>2.66</b>	<b>4.54</b>	<b>0.32</b>

T = área acumulada de las microcuencas; S = pendiente; W\* = área cubierta vegetal natural; X = área de agricultura; Y = erosión; Z\*\*\* = densidad de población. \*No se considera la superficie ocupada por las áreas urbanas; \*\*superficie de la microcuenca perteneciente al estado de Tlaxcala; \*\*\*valor promedio calculado con datos de población de 1990 a 2010.

microcuenca L, comparadas con las de la D, se multiplicaron por 7 para NT y NTK, por 10 para  $\text{N-NH}_3$  y por 8 para  $\text{N}_{\text{org}}$ . En cuanto a  $\text{N-NO}_2$  y  $\text{N-NO}_3$ , las líneas muestran que las concentraciones subieron y bajaron a lo largo del río, teniendo una alza de 1.1 y 0.13  $\text{mgL}^{-1}$ , para  $\text{N-NO}_2$  y  $\text{N-NO}_3$ , respectivamente, entre estas dos microcuencas (D y L). En forma puntual (figura 3b), las tendencias de las curvas de concentraciones de NT, NTK y  $\text{N-NH}_3$  muestran claramente cinco picos en los puntos de muestreo 3, 10, 13, 18 y 25 (microcuencas B, F, H y J), y dos caídas en los puntos 7 y 22-23 (microcuencas E y L). En los puntos de muestreo 25 a 27 (no pertenecen a ninguna microcuenca considerada en este trabajo), antes de la unión del río Zahuapan con el río Atoyac, se observaron las mayores concentraciones promedio del  $\text{N}_{\text{org}}$ . En el punto 17 se advirtió el pico de mayor concentración de  $\text{N-NO}_3$ .

Las concentraciones promedio de las formas de nitrógeno de los datos agrupados con base en los años (figura 3c) fueron 10.1, 8.71, 5.87, 4.23, 0.45 y 0.07  $\text{mgL}^{-1}$ , para NT, NTK,  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$ , respectivamente. Las curvas de concentraciones de NT, NTK y  $\text{N-NO}_3$  mostraron el mayor valor en el año 2001 y las de  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$  y  $\text{N-NO}_2$  en 2002; a partir de esos años, las curvas tendieron a disminuir. Estas máximas concentraciones fueron 29.0  $\text{mgL}^{-1}$  para NT y NTK, y 6.2  $\text{mgL}^{-1}$  para  $\text{N-NO}_3$ . Las concentraciones de  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$  y  $\text{N-NO}_2$  alcanzaron valores máximos iguales a 9.9, 6.2 y 5.0  $\text{mgL}^{-1}$ , de manera respectiva. Con excepción del  $\text{N-NH}_3$ , las concentraciones de las demás especies químicas en 2007 fueron menores, comparadas con las de 1997. Los datos de NTK de 1978 tuvieron el menor valor de Kurtosis, esto es, tuvieron la distribución más platicúrtica; los datos de NTK de 2000 tuvieron un valor de Kurtosis cercano a cero, es decir, tuvieron una distribución mesocúrtica, o más semejante a la distribución normal; los datos de  $\text{N-NO}_2$  para 2000 tuvieron el valor de Kurtosis más alto, lo que indica que presentaron la distribución más leptocúrtica. En relación con el coeficiente de

variación, los datos de  $\text{N-NO}_2$  mostraron los mayores valores, alcanzando 300% en el año 2000; por otro lado, las concentraciones de  $\text{N-NH}_3$  tuvieron los menores coeficientes de variación de alrededor de 30% en el año 2002.

En el altiplano mexicano se definen claramente dos épocas del año: una de lluvias y otra de sequía. Al agrupar los datos con base en el criterio época del año, se encontró que las concentraciones de NT, NTK,  $\text{N-NH}_3$  y  $\text{N}_{\text{org}}$  fueron mayores en el estiaje que en la época de lluvias; el caso contrario ocurrió para las concentraciones de  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$ . Las especies que tuvieron las mayores diferencias de concentración entre la época de estiaje y de lluvias fueron  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$ , que alcanzaron 55 y 220%, respectivamente. En el periodo que comprende el estudio, se observó que las mayores concentraciones de NT, NTK y  $\text{N-NH}_3$  ocurrieron en la época de estiaje, entre los años 2002-2003 y 2003-2004 (figura 3d). Estas mismas especies de nitrógeno tuvieron las menores concentraciones en las épocas de lluvias de los años 2003 y 2007, pero en este último año, las concentraciones se redujeron aún más. Respecto al  $\text{N-NO}_3$ , las mayores concentraciones se observaron en las épocas de lluvias de 1997, 2001, y para el  $\text{N-NO}_2$ , la mayor concentración se presentó en la época de lluvias de 2002. El promedio mensual de las concentraciones entre 1997 y 2007 mostraron que las mayores concentraciones promedio de NT, NTK y  $\text{N-NH}_3$  se presentaron en diciembre. Los promedios más bajos de estas mismas especies se tuvieron en agosto. Para el caso del  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$ , las mayores concentraciones promedio se registraron en julio.

De los 60 coeficientes de correlación que se realizaron, entre las concentraciones y las precipitaciones pluviales mensuales, 29 resultaron mayores que 0.5 o menores que -0.5. Sin embargo, al aplicar la prueba de  $t$ , 24 coeficientes de correlación resultaron con un nivel de significancia al 0.05, y siete coeficientes con un nivel de significancia de 0.01. En cuanto a las correlaciones entre las concentraciones y la precipitación pluvial diaria, 14 de 52 resultaron



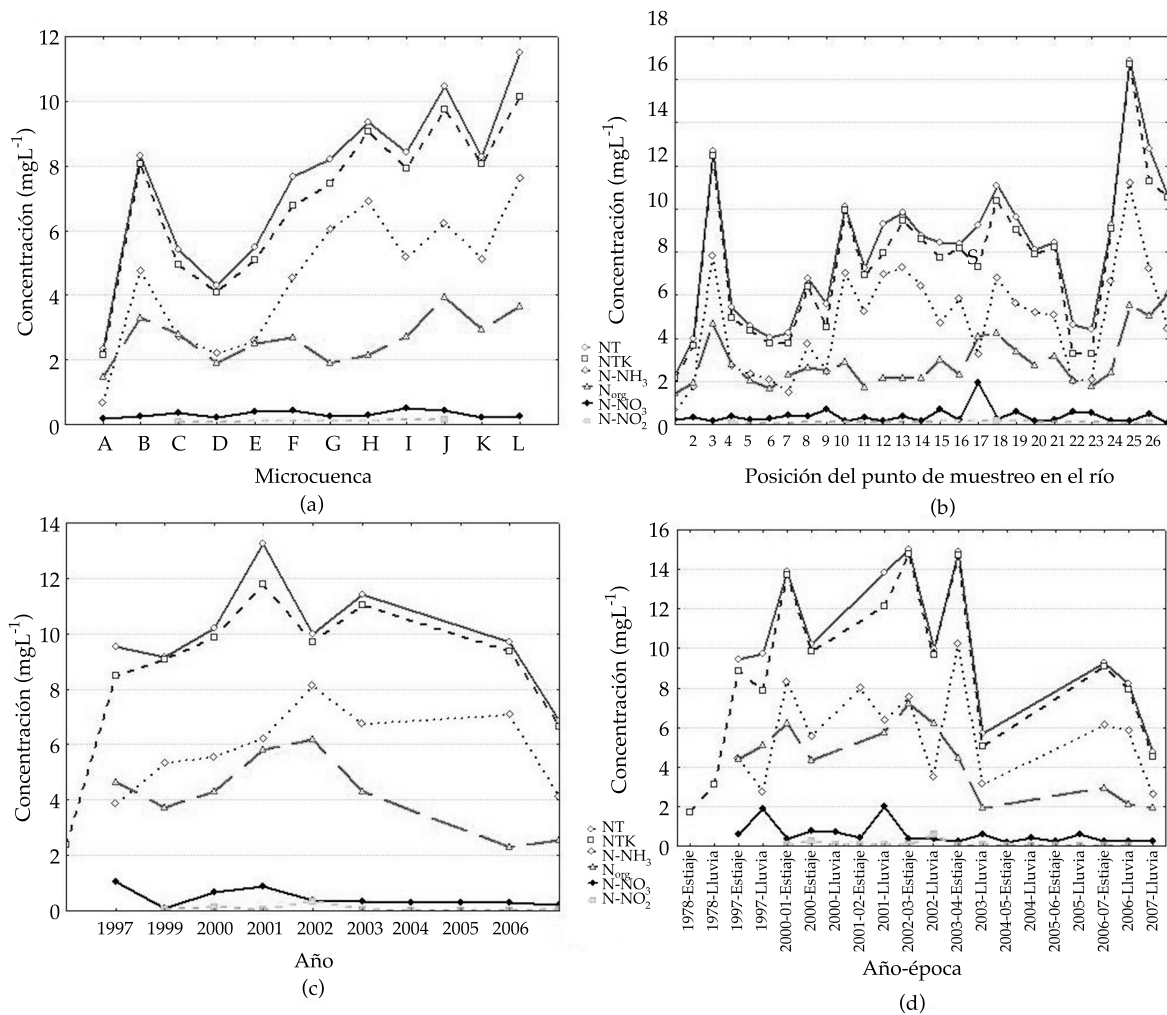


Figura 3. Concentraciones promedio de las especies de nitrógeno en el río Zahuapan: a) por microcuenca, b) por puntos de muestreo, c) por año y d) época del año.

mayores que 0.5 o menores que -0.5. Con la prueba de  $t$ , sólo ocho coeficientes resultaron con un nivel de significancia al 0.05 y cero a un nivel de 0.01.

En el nivel de punto de muestreo, los coeficientes de correlación de NT-N-NH<sub>3</sub> y NT-N<sub>org</sub> resultaron en 26 y 23 de 27 casos, respectivamente, mayores que 0.5. Con la prueba de  $t$  se obtuvieron 23 y 18 coeficientes, con un nivel de significancia de 0.05 y 20, y 12 al 0.01 para estas mismas especies químicas. Para los pares N-NH<sub>3</sub>-N<sub>org</sub>, N<sub>org</sub>-N-NO<sub>3</sub> y NT-N-NO<sub>3</sub>, se obtuvieron valores de coeficientes de correlación mayores que 0.5 o menores que

-0.5, en 9, 7 y 7 casos, respectivamente. Con la prueba de  $t$ , el número de coeficientes con un nivel de significancia al 0.05 fueron 7, 3 y 5; para 0.01 se redujeron a 4, 1 y 3 coeficientes, respectivamente. Por microcuenca, los resultados también mostraron coeficientes de correlación con un nivel de significancia de 0.05 y 0.01 entre NT-N-NH<sub>3</sub> y NT-N<sub>org</sub>. El análisis de regresión múltiple de la forma  $N-NO_3 = A_0 + A_1 \cdot N-NH_3 + A_2 \cdot N_{org}$  mostró coeficientes de correlación mayores que 0.5 en tres de las 12 microcuencas; con la forma  $N-NO_3 = A_0 + A_1 \cdot NT + A_2 \cdot N-NH_3 + A_3 \cdot N_{org}$  se obtuvieron coeficientes de correlación mayores que 0.5 en

nueve de las 12 microcuencas. Los valores de los coeficientes de las ecuaciones de regresión y los valores de  $R$  se encuentran en el cuadro 2.

## Discusión

Los promedios de concentración de NT en las doce microcuencas no fueron mayores a  $15 \text{ mgL}^{-1}$ , este valor es el límite máximo promedio diario establecido en la NOM-001-ECOL-1996 (Semarnat, 2003), para protección de vida acuática en ríos. La microcuenca L es la más próxima a este límite, con un valor de  $11.5 \text{ mgL}^{-1}$ .

Al comparar cada dato con este límite, se encuentra que 38 de ellos fueron mayores que éste. En esta microcuenca se sobrepasó en más ocasiones (ocho veces) este límite y como se encuentra a la salida de la subcuenca del río, esto hace suponer que el NT se va acumulando de la cabecera a la salida de la subcuenca. También estos promedios de NT fueron menores a los reportados por Guzmán *et al.* (2007), quienes encontraron valores que oscilaron entre 21 y  $60 \text{ mgL}^{-1}$  para el río Texcoco. En los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (Sedue, 1989), se establece como nivel máximo para nitrógeno amoniacal ( $\text{N-NH}_3$ ) una concentración de 0.06

$\text{mgL}^{-1}$  para protección de vida acuática de agua dulce. La concentración promedio de  $\text{N-NH}_3$  en la subcuenca fue de  $4.54 \text{ mgL}^{-1}$ . De los 315 datos, 310 fueron mayores que este límite. En la microcuenca C se registraron los cinco datos menores a este valor. La concentración promedio de  $\text{N-NO}_3$  igual a  $0.32 \text{ mgL}^{-1}$  en la subcuenca del río Zahuapan fue mayor a lo reportado por Navarro-Garza y Pérez-Olvera (2005) para el río Texcoco, quienes reportaron concentraciones menores de  $0.13 \text{ mgL}^{-1}$ , pero fueron más bajas que lo reportado para el río Frome, que alcanzó valores de  $10 \text{ mgL}^{-1}$ , debido a que este río tiene entradas de agua subterránea (Burt *et al.*, 2011).

En la figura 3a se ve con claridad un descenso de las concentraciones de las especies de nitrógeno, aquí consideradas, de la microcuenca B a la D. Entre estas dos microcuencas se encuentra la presa de Atlangatepec, en este embalse hay plantas acuáticas; así como a lo largo de unos 2 km en el cauce del río después de la cortina de la presa. Este tramo del río funciona como un pequeño humedal. Para el caso particular de estas dos microcuencas, el NT disminuyó de 8.3 a  $4.3 \text{ mgL}^{-1}$  (48%), el NTK de 8.1 a  $4.1 \text{ mgL}^{-1}$  (49%), el  $\text{N-NH}_3$  de 4.8 a  $2.2 \text{ mgL}^{-1}$  (54%), el

Cuadro 2. Coeficientes de las ecuaciones de regresión múltiple entre las concentraciones de las especies de nitrógeno por microcuenca.  $R$  es el coeficiente de correlación.

Microcuenca	Ecuación de regresión $\text{N-NO}_3 = A_0 + A_1 \cdot \text{N-NH}_3 + A_2 \cdot \text{N}_{\text{org}}$			$R$	Ecuación de regresión $\text{N-NO}_3 = A_0 + A_1 \cdot \text{NT} + A_2 \cdot \text{N-NH}_3 + A_3 \cdot \text{N}_{\text{org}}$				$R$
	$A_0$	$A_1$	$A_2$		$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	
A	0.08	0.07	0.05	0.34	0.14	0.43	-0.44	-0.39	<b>0.67</b>
B	0.30	-0.01	-0.01	0.25	0.29	0.05	-0.05	-0.05	0.32
C	0.20	-0.01	0.06	0.39	0.13	0.27	-0.28	-0.22	<b>0.62</b>
D	0.35	0.03	-0.10	<b>0.57</b>	0.34	0.04	-0.01	-0.14	<b>0.60</b>
E	0.18	0.07	0.02	<b>0.57</b>	0.12	0.28	-0.23	-0.27	<b>0.73</b>
F	0.18	-0.02	0.14	0.38	0.13	0.25	-0.26	-0.14	<b>0.59</b>
G	0.27	-0.03	0.09	0.45	0.18	0.25	-0.27	-0.18	<b>0.63</b>
H	0.03	0.01	0.10	0.31	0.01	0.21	-0.20	-0.13	<b>0.54</b>
I	-0.21	-0.06	0.37	<b>0.60</b>	-0.12	0.75	-0.75	-0.64	<b>0.92</b>
J	0.47	-0.08	0.11	0.38	0.06	0.71	-0.73	-0.67	<b>0.87</b>
K	0.19	-0.02	0.05	0.38	0.16	0.11	-0.13	-0.07	0.49
L	0.34	-0.01	-0.01	0.23	0.32	0.06	-0.06	-0.06	0.33

$N_{org}$  de 3.3 a 1.9  $mgL^{-1}$  (42%) y el  $N-NO_3$  de 0.24 a 0.23  $mgL^{-1}$  (4%). No fue posible estimar la baja del nitrito por carecer de datos. Estos porcentajes de disminución, con excepción de los nitratos, se aproximan al 50% de remoción de N reportado por Kunz *et al.* (2011b), para la presa Itezhi-Tezhi, localizada en el bajo río Kafue, el mayor tributario del río Zambezi (Zambia), y por Kunz *et al.* (2011a), para el lago Kariba (Zambia-Zimbawe), ambos grandes cuerpos de agua localizados en clima tropical. La desnitrificación y acumulación en sedimentos contribuyen de manera importante en la remoción de nitrógeno, pudiendo alcanzar 70% (Kunz *et al.*, 2011a). En los embalses, las especies químicas del nitrógeno están sujetas a reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso en los sedimentos, absorción del amonio por las plantas acuáticas y fijación del amonio en las arcillas (Stumm y Morgan, 1996). Estos procesos en la presa de Atlagantepec posiblemente sean los causantes de la disminución de las concentraciones de las especies químicas del nitrógeno.

Con los datos del cuadro 1 hubo correlación positiva con un nivel de significancia al 0.01 entre el área acumulada de las microcuencas en dirección de la corriente del río y las concentraciones de las especies de nitrógeno para NT y  $N-NH_3$ . La correlación positiva indica que el área acumulada y las concentraciones de estas especies de nitrógeno tuvieron la misma tendencia creciente de la cabecera a la salida de la subcuenca. Sin embargo, para el caso del  $N-NO_3$ , la correlación resultó igual que -0.415, pero no fue significativa. Respecto a la pendiente del terreno de las microcuencas y las concentraciones de las especies químicas medidas en la corriente del río, se encontró que no hay correlación. El mayor valor de correlación se obtuvo para la pendiente contra el  $N-NO_3$ , con una  $r = -0.404$ , la cual no es significativa. De la misma forma, los datos de las concentraciones de nitrógeno no tuvieron relación con las áreas de cubierta vegetal, agricultura y erosión en las microcuencas. Este resultado difiere de lo reportado por

otros autores. Por ejemplo, Tesoreiro *et al.* (2009) señalan una relación entre el nitrato y la agricultura, Burt *et al.* (2011) y Alexander *et al.* (2008) mencionan la relación existente en su estudio entre las concentraciones de nitrógeno y la agricultura. Por otro lado, los datos de las densidades de población en las microcuencas y las concentraciones de NT,  $N-NH_3$  y  $N-NO_3$  mostraron correlaciones positivas a un nivel de significancia de 0.05 con la prueba de  $t$ . Con este análisis se deduce que las concentraciones de NT y  $N-NH_3$  están correlacionadas con el área acumulada de las microcuencas conforme a la dirección de la corriente y la densidad de población, esta última también tuvo correlación con el  $N-NO_3$ .

El comportamiento de las concentraciones de las especies químicas del nitrógeno en los años considerados mostró que de 1997 a 2001 hubo un incremento, y de este año a 2007, una disminución de NT, NTK y  $N-NO_3$ ; esto mismo ocurrió para  $N-NH_3$ ,  $N_{org}$  y  $N-NO_2$ , pero el cambio de tendencia ocurre en 2002. Xia *et al.* (2002) reportaron para el río Amarillo un incremento de 0.04, en 1980, a 0.36  $mgL^{-1}$  de  $N-NH_4$ , en 1999, es decir, una tasa anual de 0.0168; mientras que en el río Zahuapan, el incremento para  $N-NH_3$  es de 3.86 en 1997 a 8.11  $mgL^{-1}$  en 2002, lo cual arrojó una tasa anual de 0.85. De 2002 a 2005, la tasa anual de disminución de la concentración de esta especie química fue de 0.798, con una diferencia entre 2007 y 1997 de 0.26  $mgL^{-1}$ . Como el área, la pendiente del terreno de las microcuencas, la cubierta vegetal, la agricultura y áreas erosionadas, no han cambiado en las microcuencas en este lapso y la población ha mantenido un aumento constante, la única explicación del cambio de tendencia de las concentraciones son factores externos que promueven la salida de nitrógeno del río. Una posible salida de nitrógeno del río puede ser las plantas de tratamiento, que tratan el agua residual de algunos municipios antes de descargar al río Zahuapan, y por condiciones ambientales de la corriente del río, que promueven desnitrificación, es decir, la transformación de  $NO_3^- \rightarrow N_2$ .

También Xia *et al.* (2002) reportaron para el río Amarillo que las concentraciones de  $\text{N-NH}_4$ ,  $\text{NIT}$  y  $\text{N-NO}_3$  son mayores en la época de sequía que en la de lluvias. Este mismo resultado se obtuvo para  $\text{NT}$ ,  $\text{N-NH}_3$  y  $\text{N}_{\text{org}}$  en el río Zahuapan. Sin embargo, el  $\text{N-NO}_3$  y el  $\text{N-NO}_2$  tuvieron las mayores concentraciones en la época de lluvias, en los años 1997 y 2001 para el primero, y 2002 para el segundo. En específico, las mayores concentraciones de  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$  se presentaron en julio, es decir, en plena época de lluvias, sin que esto signifique que exista correlación entre la precipitación pluvial y las concentraciones de nitrógeno, debido a que no se obtuvieron coeficientes de correlación significativos. En las microcuencas I y J se notó claramente la diferencia de las concentraciones entre estas dos épocas del año. No se vio de manera contundente qué variable considerada en este trabajo tuvo el mayor grado de influencia en este resultado. Sin embargo, en esas dos microcuencas, las densidades de población fueron las más altas comparadas con las otras.

Por último, con base en Snoeyink y Jenkins (1990), y Stumm y Morgan (1996), se puede plantear que la cadena de transformaciones que tiene el nitrógeno en los puntos muestreados considerados en este trabajo del río Zahuapan es el siguiente:  $\text{N}_{\text{org}}$  (del agua residual)  $\rightarrow \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ . Esto es, que no hay otras entradas de nitrato al río, como por ejemplo debidas a las aguas subterráneas y que la salida es sólo por  $\text{N}_2$ , del cual no se tienen mediciones, por lo que no es considerado en el análisis de regresión múltiple. Esta cadena de transformaciones del nitrógeno se fundamenta con el resultado del análisis de regresión múltiple, que considera al  $\text{NO}_3$  como una variable dependiente del  $\text{NT}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$  y  $\text{NH}_3$ , con base en que se obtuvieron coeficientes de correlación mayores que 0.5 en las microcuencas A, C, D, E, F, G, H, I y J. En estas dos últimas microcuencas se obtuvieron valores de coeficientes de correlación iguales a 0.92 y 0.87, y las mayores densidades de población (1 153 y 964 hab.-km<sup>2</sup>).

## Conclusiones

Con la realización de este trabajo, empleando atributos de las microcuencas del río Zahuapan y datos históricos de concentraciones de  $\text{NT}$ ,  $\text{N}_{\text{org}}$ ,  $\text{N-NH}_3$ ,  $\text{N-NO}_2$  y  $\text{N-NO}_3$  en la corriente del río, se concluye que:

- Las concentraciones promedio de  $\text{NT}$  no excedieron, en ninguna de las doce microcuencas, el límite máximo promedio diario (15 mgL<sup>-1</sup>) establecido en la NOM-001-ECOL-1996 (Semarnat, 2003), para protección de vida acuática en ríos.
- En toda la subcuenca del río Zahuapan, la concentración de  $\text{N-NH}_3$  fue mayor a 0.06 mgL<sup>-1</sup>, que es el límite establecido en los criterios ecológicos CE-CCA-001/89 (Sedue, 1989) para la protección de vida acuática de agua dulce. Sin embargo, las concentraciones promedio de  $\text{NT}$  fueron menores y las de  $\text{N-NO}_3$  mayores a las del río Texcoco. Las concentraciones de nitrógeno como nitrato en el río Zahuapan fueron menores a las del río Frome.
- Es posible que las disminuciones de concentración de las especies de nitrógeno en las microcuencas B, C y D hayan sido un efecto de la presa de Atlangatepec y de la vegetación acuática que se encuentra en el cauce del río Zahuapan.
- Se encontró correlación entre las concentraciones de  $\text{NT}$  y  $\text{N-NH}_3$  con el área acumulada de las microcuencas, conforme a la dirección de la corriente del río y la densidad de población, esta última también tuvo correlación con el  $\text{N-NO}_3$ . Las variables: pendiente del terreno, cubierta vegetal, agricultura y áreas erosionadas de las microcuencas, no tuvieron correlación con ninguna de las especies de nitrógeno aquí consideradas.
- La tendencia creciente de las concentraciones del nitrógeno cambió de una tendencia en aumento a una de descenso en los años 2001 y 2002. Para el caso de  $\text{N-NH}_3$ , la tasa de aumento anual, calculada



de 1997 a 2002, en el río Zahuapan fue de 0.85. Pero también hubo una tasa anual de disminución de esta especie, de 2002 a 2005, igual a 0.8.

- Para el NT,  $\text{N-NH}_3$  y  $\text{N}_{\text{org}}$ , se encontró que sus concentraciones disminuyeron en la época de lluvias, pero no así para las de  $\text{N-NO}_3$  y  $\text{N-NO}_2$ , que aumentaron en esa misma época del año.
- El análisis de regresión múltiple, considerando al  $\text{NO}_3$  como una variable dependiente del NT,  $\text{N}_{\text{org}}$  y  $\text{NH}_3$ , mostró altos valores de coeficientes de correlación. Esto sugiere que el  $\text{NO}_3$  en el río Zahuapan no depende de otras fuentes, sólo de las aguas de origen residual.

## Agradecimientos

A la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Tlaxcala, por las facilidades en la obtención de datos de concentración de nitrógeno del río Zahuapan. A la licenciada Carolina Saraf Espejel Suárez y Esahú Flores Vera, por su apoyo en la elaboración del manuscrito.

Recibido: 15/05/2012

Aceptado: 02/11/2012

## Referencias

- ALEXANDER, R.B., SMITH, R.A., SCHWARZ, G.E., BOYER, E.W., NOLAN, J.V., and BRAKEBILL, J.W. Differences in phosphorus and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi River Basin. *Environmental Science and Technology*. Vol. 42, No. 3, December, 2008, pp. 822-830.
- BURT, T.P., HOWDEN, N.J.K., WORRAL, F., WHELAN, M.J., and BIEROZA, M. Nitrate in United Kingdom rivers: Policy and its outcomes since 1970. *Environmental Science and Technology*. Vol. 45, No. 1, special issue July, 2011, pp. 175-181.
- CGE. *Diagnóstico preliminar de la contaminación del Río Zahuapan, Tomo II*. Tlaxcala, México: Coordinación General de Ecología, Gobierno del Estado de Tlaxcala, 1997, 177 pp.
- CONAGUA. *Estadísticas del agua en México. Edición 2010*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2010, 249 pp.
- CONAGUA. *Se pronostican 34 ciclones tropicales en la temporada de lluvias 2011* [en línea]. Comisión Nacional del Agua. Consultada en noviembre de 2011. Disponible en *World Wide Web*: <http://smn.cna.gob.mx/noticias/2011/Comunicado062-11.pdf>.
- ESRI®. *ArcMap™ 9.3. License Type: ArcView*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute, 2008, software.
- GUZMÁN, Q.A., PALACIOS, V.O.L., CARRILLO, G.R., CHÁVEZ, M.J. y NIKOLSKII, G.I. La contaminación del agua superficial en la cuenca del río Texcoco, México. *Agrociencia*. Vol. 41, núm. 4, mayo-junio de 2007, pp. 385-393.
- HAMMER, M.J., and HAMMER, M.J.Jr. *Water and wastewater technology*. Fourth edition. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2001, 536 pp.
- HAYAKAWA, A., SHIMIZU, M., WOLI, K.P., KURAMOCHI, K., and HATANO, R. Evaluating stream water quality through land use analysis in two grassland catchments: Impact of wetlands on stream nitrogen concentration. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 35, March-April, 2006, pp. 617-627.
- INEGI. *Mapas digitales* (archivo electrónico). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1995.
- INEGI. *Estratificación de datos en formato dxf de los conjuntos de datos vectoriales: Carta topográfica, escala 1:50,000. Versión 4* (archivo electrónico). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 1999.
- INEGI. *Censo de población y vivienda 2010* [en línea]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultada en octubre de 2011a. Disponible en *World Wide Web*: [http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta\\_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est](http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est).
- INEGI. *II Censo de población y vivienda 2005* [en línea]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultada en octubre de 2011b. Disponible en *World Wide Web*: [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar\\_info.aspx](http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar_info.aspx).
- INEGI. *XII Censo general de población y vivienda 2000* [en línea]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultada en octubre de 2011c. Disponible en *World Wide Web*: [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar\\_info.aspx](http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar_info.aspx).
- INEGI. *Conteo de población y vivienda 1995* [en línea]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultada en octubre de 2011d. Disponible en *World Wide Web*: [http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar\\_info.aspx](http://www3.inegi.org.mx/sistemas/iter/consultar_info.aspx).
- IZURIETA, D.J.L., HUERTO, D.R.I. y MIJANGOS, C.M.A. *Aporte de nutrientes por fuentes no puntuales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México*. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS-FEMISCA, Cancún, México, octubre de 2002.



- KUNZ, M.J., ANSELMETTI, F.S., WÜEST, A., WEHRLI, B., VOLLENWEIDER, A., THÜRING, S., and SENN, D.B. Sediment accumulation and carbon, nitrogen, and phosphorus deposition in the large tropical reservoir Lake Kariba (Zambia/Zimbabwe). *J. Geophys. Res.* Vol. 116, March, 2011a, G03003, doi: 10.1029/2010JG001538.
- KUNZ, M.J., WÜEST, A., WEHRLI, B., LANDERT, J., and SENN, D.B. Impact of a large tropical reservoir on riverine transport of sediment, carbon, and nutrients to downstream wetlands. *Water Resources Research.* Vol. 47, December, 2011b, W12531, doi: 10.1029/2011WR010996.
- LINDSAY, J. *TAS (Terrestrial Analysis System)*. Versión 2.0.9, número de serie 45369ABCDEF1731 (software). Manchester, UK: Manchester University, 2005.
- LÓPEZ, H.M., RAMOS, E.M.G. y CARRANZA, F.J. Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala, México. *Hidrobiológica*. Vol. 17, suplemento 1, abril de 2007, pp. 17-30.
- MARTÍNEZ, M.M., GUTIÉRREZ, O.C., REYES, S.J.R., MATA, A.I. y SÁNCHEZ, D.L.F. *Estudio hidrogeológico de la porción alta del acuífero Alto Atoyac (estado de Tlaxcala). Informe Final*. Jiutepec, México: Subcoordinación de Hidrología Subterránea, Coordinación de Hidrología, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2007, 95 pp.
- McBEAN, E. y ROVERS, F.A. *Statistical procedures for analysis of environmental monitoring data and risk assessment*. Environmental Management and Engineering Series vol. 3. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall PTR, 1998, 313 pp.
- NAVARRO-GARZA, H. y PÉREZ-OLVERA, M.A. Caracterización inorgánica del agua del río Texcoco, entre épocas del año y años. *Terra Latinoamericana*. Vol. 23, núm. 2, abril-junio de 2005, pp. 183-190.
- PUCKETT, L.J., and HUGHES, W.B. Transport and fate of nitrate and pesticides: Hydrogeology and riparian zone processes. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 34, November-December, 2005, pp. 2278-2292.
- SANTIAGO-FRAGOSO, S. y SANDOVAL-MANRIQUE, J.C. Coleópteros acuáticos y su relación con la dinámica fisicoquímica del río Cuautla (tramo Tetelcingo-Anenecuilco), Morelos, México. *Hidrobiológica*. Vol. 11, núm. 1, junio de 2001, pp. 19-29.
- SEDUE. *Proyecto de ordenamiento ecológico de la cuenca alta del Río Balsas, con atención a la microregión del Río Zahuapan*. Contrato núm. 412-009-85. México, D.F.: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología/Análisis y Soluciones, S.C., 1985, 163 pp.
- SEDUE. CE-CCA-001/89. CE-CCA-001/89: *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua*. México D.F.: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología/Diario Oficial de la Federación, 1989, 15 pp.
- SEMARNAT. NOM-001-ECOL-1996: *Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/Diario Oficial de la Federación, 2003, 33 pp.
- SILVA, G.S.E., MUÑOZ, O.A., DE LA ISLA DE BAUER, M.L. e INFANTE, G.S. Contaminación ambiental en la región de Atlixco: 1. Agua. *Terra Latinoamericana*. Vol. 20, núm. 3, julio-septiembre de 2002, pp. 243-251.
- SNOEYINK, V.L., y JENKINS, D. *Química del agua*. México, D.F.: Editorial Limusa, 1990, 508 pp.
- STATSOFT, INC. *Statistica (data analysis software system)*, version 8.0. StatSoft, Inc., www.statsoft.com, 2007.
- STUMM, W. and MORGAN, J.J. *Aquatic Chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*. Third edition. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1996, 1022 pp.
- TESOREIRO, A.J., DUFF, J.H., WOLOCK, D.M., and SPAHR, N.E. Identifying pathways and processes affecting nitrate and orthophosphate inputs to stream in agricultural watersheds. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 38, September-October, 2009, pp. 1892-1900.
- TOLEDO, A. *Ríos, costas y mares: hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y El Colegio de Michoacán, 2003, 116 pp.
- WERNER, G. *Los suelos en el estado de Tlaxcala, Altiplano Central Mexicano. Investigaciones relacionadas con su desarrollo, extensión, erosión, y su utilización bajo influencia de actividades agrícolas en 3000 años (con aportaciones de G. Miehl)*. Tlaxcala, México: Gobierno del Estado de Tlaxcala, Universidad Autónoma de Tlaxcala, 1988, 92 pp.
- XIA, X., ZHOU, J., and YANG, Z. Nitrogen contamination in the Yellow River Basin of China. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 31, May-June, 2002, pp. 917-925.

## Abstract

MUÑOZ-NAVA, H., SUÁREZ-SÁNCHEZ, J., VERA-REYES, A., BAUMANN, J., CARREÓN-COCA, M.F. & MONTEALEGRE-MUÑOZ, R.G. Relationship between nitrogen and the Zahuapan River microbasins, Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 4, September-October, 2013, pp. 47-61.

Agricultural and wastewater discharges are significant sources of nitrogen in streams and rivers. The aim of this study was to spatially and temporally describe the concentrations of nitrogen species in the Zahuapan River and their relationships with some of the attributes of the microbasins, including area, slope, vegetation cover, agriculture, soil erosion, population and pluvial precipitation. The polygons for the Zahuapan River microbasins were defined using the TAS program. The results showed that nitrogen concentrations diminished in the microbasins located near the Atlangatepec dam. The concentrations were highest during the years 2001 and 2002. Concentrations of NT, NTK,  $N-NH_3$ , and Norg increased during the dry months while  $N-NO_3$  and  $N-NO_2$  decreased during this period of the year. The relationship between concentrations and monthly precipitation resulted in a greater number of significant coefficient correlations than for daily precipitation. The correlation coefficients for nitrogen species were significant at the 0.05 level. The multiple regression analysis  $N-NO_3 = A_0 + A_1*NT + A_2*N-NH_3 + A_3*N_{org}$  showed coefficients greater than 0.5 in 9 to 12 microbasins. This study concluded that the Atlangatepec dam plays a role in the concentration of nitrogen in the Zahuapan River.

**Keywords:** nitrogen, Zahuapan River, microbasins.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Hipólito Muñoz Nava

Centro de Investigación en Ciencias Biológicas  
Universidad Autónoma de Tlaxcala  
Autopista Texmelucan-Tlaxcala km 10.2  
90120 Ixtacuixtla, Tlaxcala, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (248) 4815 482  
hipolito78@hotmail.com

Dr. Juan Suárez Sánchez

Laboratorio de Medio Ambiente  
Facultad de Agrobiología  
Universidad Autónoma de Tlaxcala  
Km 10.5 Autopista San Martín-Tlaxcala  
90120 Ixtacuixtla, Tlaxcala, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (248) 4815 382  
jsuarezs71@hotmail.com

M.C. Andrea Vera Reyes

Centro de Investigación en Ciencias Biológicas  
Universidad Autónoma de Tlaxcala  
Km 10.2 Autopista Texmelucan-Tlaxcala  
90120 Ixtacuixtla, Tlaxcala, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (248) 4815 482  
cambisol@hotmail.com

Dr. Jürgen Baumann

Consultor  
Calle Serranía 155, Col. Jardines del Pedregal de San Ángel,  
Delegación Coyoacán  
04500 México, D.F., MÉXICO  
Teléfono: +52 (55) 3763 0849  
j.baumann62@hotmail.com

M.C. Miguel Francisco Carreón Coca

Laboratorio de Medio Ambiente  
Facultad de Agrobiología  
Universidad Autónoma de Tlaxcala  
Calle Benito Juárez núm. 3  
90250 Tlaxco, Tlaxcala, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (241) 4961 589  
biococa@hotmail.com

Lic. Raúl Gehiel Montealegre Muñoz

Facultad de Agrobiología  
Universidad Autónoma de Tlaxcala  
Calle Benito Juárez núm. 3  
90250 Tlaxco, Tlaxcala, MÉXICO  
Teléfono y fax: +52 (241) 4961 589  
latin.fox@hotmail.com