

# MODELACION DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TULA, ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO

## MODELING OF THE QUALITY OF WATER OF RIVER TULA, STATE OF HIDALGO, MEXICO

ROSALBA MONTELONGO CASANOVA

*Ingeniero Químico por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México*

ALBERTO JOSÉ GORDILLO MARTÍNEZ

*Dr. en Ciencias Químicas, Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*

ELENA MARÍA OTAZO SÁNCHEZ

*Dra. en Ciencias Químicas, Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*

JOSÉ ROBERTO VILLAGÓMEZ IBARRA

*Dr. en Ciencias Químicas, Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*

OTILIO ARTURO ACEVEDO SANDOVAL

*Dr. en Ciencias Químicas, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*

FRANCISCO PRIETO GARCÍA

*Dr. en Ciencias Químicas, Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
prietog@uaeh.reduaeh.mx*

Recibido para revisar Enero 12 de 2007, aceptado Abril 13 de 2007, versión final Octubre 10 de 2007

**RESUMEN:** Modelar la calidad del agua del río Tula, desde el emisor central hasta su confluencia con la presa Endhó, ha sido el objetivo central de este trabajo. Se evaluó durante dos años, considerando una longitud de 50 km en 4 zonas y 35 sitios de muestreo. La mayor cantidad de materia orgánica la aporta el emisor central, agua sin tratamiento de la Ciudad de México y zona conurbana. Los valores de DBO variaron desde 1.16 hasta 486.81 mg O<sub>2</sub>/L; el oxígeno disuelto entre 1.52 y 5.82 mg/L, esto implica afectación para el desarrollo de la vida acuática. La alcalinidad rebasó el criterio ecológico de calidad como fuente de agua potable con valor de 458.01 mg/L. Las grasas presentaron variaciones desde 0.9 mg/L hasta 18.1 mg/L y el nitrógeno amoniacal fuera de los límites establecidos para protección de la vida acuática con valores desde 0.09 a 64 mg/L; los nitratos (6.24 mg/L) y nitritos (0.5-1.304 mg/L) rebasan el criterio ecológico. Los metales cadmio, plomo, hierro, manganeso y zinc están en concentraciones por encima de lo permisible en y en algunos tramos se reportó presencia de mercurio. Los coniformes fecales fueron detectados en valores desde  $2.1 \times 10^4$  hasta  $2.40 \times 10^{11}$  NMP/100 ml. En general la toxicidad en las descargas de aguas residuales demostró que todas se presentan de moderada a alta. Solamente tres estaciones de monitoreo (19 %) con excelente calidad, DBO<sub>5</sub> menores o iguales a 3 mg/L, lo que se considera como agua no contaminada por materia orgánica biodegradable.

**PALABRAS CLAVE:** Contaminación, clasificación, calidad, modelo matemático.

**ABSTRACT:** The central objective of this work is to model the quality of the water of Tula River, from the central emitter to their confluence with the Endhó dam. It was evaluated during two years, considering a length of 50 km in 4 zones and 35 sites of sampling. The central emitter contributes to the greater amount of organic matter, water without treatment of the City of Mexico and co urbane zone. The values of DBO varied from 1.16 up to 486.81 mg O<sub>2</sub>/L; the oxygen dissolved between 1.52 and 5.82 mg/L, this implies affectation for the development of the aquatic life. The alkalinity exceeded the ecological criteria of quality as a source of potable water with value of 458.01 mg/L.

The fats displayed variations from 0.9 mg/L up to 18.1 mg/L and ammonia cal nitrogen outside the limits established for protection of the aquatic life with values from 0.09 a 64 mg/L; nitrates (6.24 mg/L) and nitrites (0.5-1.304 mg/L) exceed the ecological criteria. The metals cadmium, lead, iron, manganese and zinc are in concentrations over the permissible rank and in some sections mercury presence was reported. The fecal coliforms were detected in values from  $2.1 \times 10^4$  up to  $2.40 \times 10^{11}$  NMP/100 milliliters. In general, the toxicity in the residual water unloading demonstrated that all appears of moderate to high. Only there were three monitored stations (19%) with excellent quality, 3 smaller or equal  $DBO_5$  to mg/L, which is considered like water no contaminated by biodegradable organic matter.

**KEY WORDS:** Contamination, classification, quality, mathematical model.

## 1. INTRODUCCIÓN

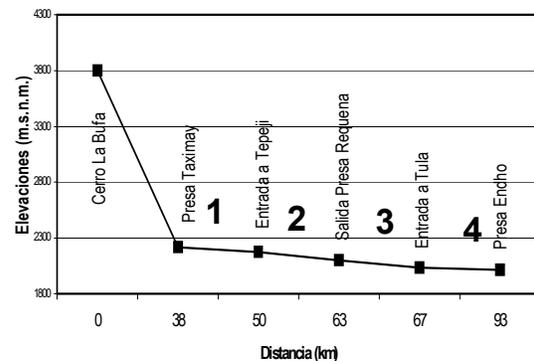
El río Tula, constituye el colector general del río Pánuco en sus orígenes. Su nacimiento es en el cerro de San Pablo, forma parte de la Sierra de la Catedral, que constituye el parte aguas entre las cuencas del río Pánuco y Lerma [1]. De acuerdo al artículo 87 de la Ley de Aguas Nacionales, la Comisión Nacional del Agua [2] determinará los parámetros que deberán cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos puedan recibir. Así mismo, las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, que se publican en el Diario Oficial de la Federación lo mismo que sus modificaciones para su observancia.

La importancia de un estudio de modelación de la calidad de las aguas estriba en conocer la cantidad, calidad y tipo de sustancias que son arrojadas a un cuerpo receptor. Con base a su calidad se pueden fijar condiciones particulares de descarga, acciones encaminadas a la conservación del recurso, ayudando así a mantener la flora y fauna de los cuerpos receptores, el reuso del agua y promover la conservación del medio natural e impulsar a sectores en los cuales se necesita del recurso hídrico para poder desarrollarse [1]. Determinar por modelación la capacidad de asimilación y dilución del río Tula en el tramo que comprende desde el Emisor Central hasta su confluencia con la presa Endhó y las cargas de contaminantes que pueden recibir, ha sido el objetivo central de este trabajo. Se ha considerado el uso a que se destina el recurso, con información de calidad del agua, así como las características y condiciones de las corrientes, medidas en

laboratorio y campo, y evaluadas mediante la aplicación de expresiones matemáticas [4].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El río Tula, constituye los orígenes del colector general de la Región Hidrológica N° 26; descarga en el Golfo de México, aguas abajo de la ciudad de Tampico, Tamaulipas. La cuenca drenada por el río abarca un área de 6551 Km<sup>2</sup>. Queda comprendida entre los meridianos 98°41' y 99°41' de longitud oeste y entre los paralelos 19° 36' y 20° 41' de latitud norte [5]. Dentro de la cuenca se ubican 11 municipios pertenecientes al Estado de México y 22 pertenecientes al Estado de Hidalgo [4]. Este estudio comprende desde la salida de la presa Taximay hasta la confluencia de la presa Endhó (ver tramos en la figura 1).



**Figura 1.** Tramos (1-4) y niveles de elevación sobre el nivel del mar en el cauce del río Tula.

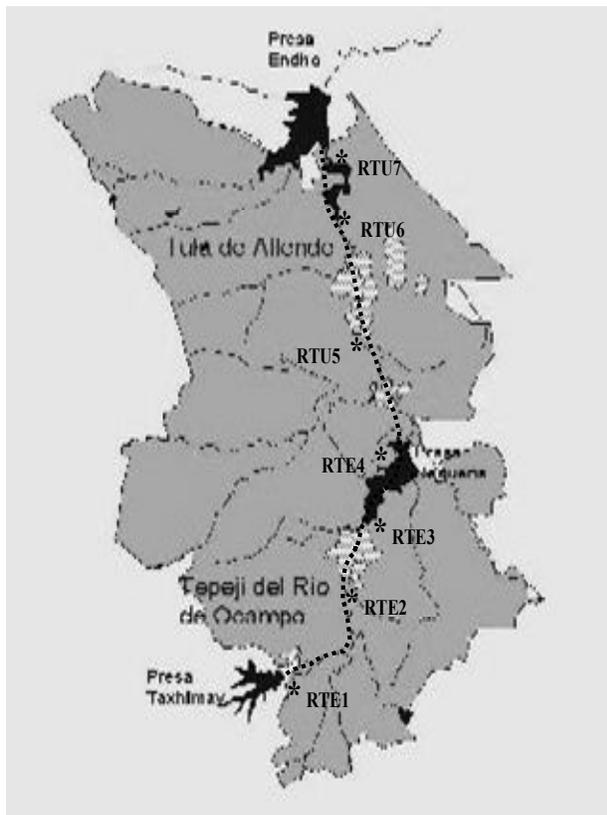
**Figure 1.** Sections (1-4) and levels of elevation on the level of the sea in the channel of the Tula river

Los trabajos de análisis hidrométrico, cálculos del gasto ecológico, fuentes de contaminación,

infraestructura de saneamiento, inventarios de plantas de tratamiento de aguas residuales, potabilizadoras, programa de monitoreo, aforo y modelación matemática de la calidad del agua, se realizó según [6]. Esto último incluye la selección del modelo matemático [7], división de la corriente en tramos, la calibración del modelo matemático, la simulación de escenarios y el cálculo de la capacidad de asimilación, dilución, cargas máximas permisibles en las descargas y metas. En la figura 2 se muestra un mapa con la delimitación del área de estudio.

En la Tabla 1 se indican las seis estaciones de monitoreo en este estudio y su denominación correspondiente.

El modelo QUAL2E [7], por sus características, permite modelar los principales parámetros de calidad del agua: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nutrientes, organismos coliformes entre otros. Está diseñado para simular diferentes escenarios, estrategias alternativas o complementarias para conservar y mejorar la calidad del agua de corrientes superficiales.



**Figura 2.** Delimitación del área de estudio  
**Figure 2.** Delimitation of the study area

**Tabla 1.** Estaciones de monitoreo y denominaciones

**Table 1.** Stations of monitory and denominations

Estación	Tramo
RTE1	Rio Tepeji (Golondrinas)
RTE2	Rio Tepeji (entrada a Tepeji)
RTE3	Rio Tepeji, Pte. El Salto
RTE4	Rio Tepeji, cortina P. Requena
RTU5	Rio El Salto - Tula
RTU6	Rio Tula, AA Desc. PEMEX
RTU7	Presa Endhó

Permite evaluar la capacidad de asimilación y dilución de contaminantes del cuerpo receptor, se pueden incluir múltiples descargas de aguas residuales y aprovechamientos e incluye módulos para modelar fenómenos físicos, como la dilución de contaminantes por la adición de agua y la dilución de oxígeno en el agua a través del proceso de reaeración. El modelo se calibra con los parámetros medidos en la corriente, para representar la calidad del agua para cada sistema [8]. Considera que tanto el flujo de la corriente en el río como la carga de contaminantes son constantes.

El primer paso en el modelado del sistema es subdividirlo en tramos o segmentos que tienen características hidráulicas uniformes. Cada tramo se divide a su vez en elementos computacionales de igual longitud. Los tramos del río, que se representan como conjuntos de elementos, son la base de la entrada de datos. Para todos los elementos computacionales dentro de un tramo, tanto los datos hidráulicos como los coeficientes de velocidad de reacción, condiciones iniciales e incrementos de flujo, se consideran constantes. Un tramo de la corriente ( $n$ ) ha sido dividido en subtramos o elementos computacionales de longitud  $\Delta x$ . Para cada elemento en el balance hidráulico se considera el flujo que entra por la cara aguas arriba del elemento ( $Q_{i-1}$ ), las fuentes externas o aprovechamientos ( $Q_{xi}$ ) y el flujo

saliente ( $Q_i$ ) a través de la cara aguas abajo del elemento. De manera similar, para el elemento, se puede escribir un balance de materiales para cualquier componente  $C$ . En el balance de materiales se considera tanto transporte de masa ( $QC$ ) como dispersión:

$$\left( A \frac{D_L}{\Delta x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

a lo largo del eje de la corriente. La masa puede removerse y añadirse al sistema vía fuentes y aprovechamientos externos ( $Q_x C_x$ ), y también, puede ser añadida y removida vía fuentes y sumideros internos ( $S_i$ ), tales como fuentes bentónicas y transformaciones biológicas. La corriente se conceptualiza como una cadena de reactores completamente mezclados (elementos computacionales) ligados secuencialmente, uno a otro, vía los mecanismos de transporte y dispersión. Los grupos secuenciales de estos reactores se definen como tramos en los cuales los elementos computacionales tienen las mismas propiedades hidrogeométricas y constantes de velocidad. La ecuación básica del modelo es la ecuación de transporte de masa, que se integra numéricamente en tiempo y espacio para cada parámetro de calidad del agua. Esta ecuación incluye los efectos de advección, dispersión, dilución, reacciones de los componentes e interacciones, y fuentes y sumideros. Para todo componente  $C$ , esta ecuación puede escribirse como:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_x \bar{u} C)}{\partial x} dx + (A_x dx) \frac{dc}{dt} + s \quad (2)$$

donde,

$M$ =masa (M);  $x$ =distancia (L);  $t$  = tiempo (T);  $C$ =concentración (ML<sup>-3</sup>);  $A_x$  = área de sección transversal (L<sup>2</sup>);  $D_L$ =coeficiente de dispersión (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>);  $dc/dt$  = velocidad media (LT<sup>-1</sup>) y  $s$  = fuentes externas o sumideros (MT<sup>-1</sup>). Como  $M = VC$ , se puede escribir:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial (VC)}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

donde,

$V = A_x dx$  = incremento de volumen (L<sup>3</sup>).

Si consideramos que el flujo en la corriente

es estacionario,  $\frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ , entonces el término  $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$  y la ecuación (Ec. 3) resulta:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = V \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4)$$

combinando las ecuaciones Ec.2 y Ec .4 y reorganizando se tiene que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{A_x \partial x} - \frac{\partial (A_x \bar{u} C)}{A_x \partial x} + \frac{dc}{dt} + \frac{s}{V} \quad (5)$$

Los términos del lado derecho de la ecuación representan, respectivamente, dispersión, advección, cambios en los componentes y fuentes/sumideros externos y dilución. El término  $\frac{dc}{dt}$  se refiere sólo a cambios en los componentes tal como crecimiento y consumo,

y no deben confundirse con el término  $\frac{\partial C}{\partial t}$ , el gradiente local de concentraciones. Este último incluye el efecto de los cambios en los componentes, así como dispersión, advección, fuentes/sumideros y diluciones. Bajo condiciones de estado estacionario, la derivada local es cero;

$\frac{\partial C}{\partial t} = 0$  en otras palabras  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ . Los cambios incluyen las reacciones químicas y biológicas y las interacciones que ocurren en la corriente. Ejemplos de estos son, reaeración, respiración y fotosíntesis de algas y decaimiento de coliformes. El programa considera que el régimen hidráulico

de la corriente es estado estacionario,  $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$ , por lo tanto, el balance hidrológico para un elemento computacional puede escribirse simplemente como:

$$\left( \frac{\partial Q}{\partial x} \right)_i = (Q_x)_i \quad (6)$$

donde  $(Q_x)_i$  es la suma de los afluentes externos y aprovechamientos para dicho elemento. Una vez que la ecuación (Ec. 6) se ha resuelto para  $Q$ , las otras características hidráulicas de los segmentos de la corriente pueden determinarse con ecuaciones de la forma

$$\bar{u} = a Q^b, \quad (7);$$

$$A_x = Q / \bar{u}, \quad (8) \text{ y}$$

$$d = \alpha Q^\beta, \quad (9),$$

donde  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes empíricas, y  $d$  es la profundidad de la corriente.

El modelo aumenta el flujo de la corriente, después de que se han alcanzado las condiciones de estado estacionario, compara la concentración de oxígeno disuelto simulado con el nivel objetivo previamente especificado en cada tramo. Si esta concentración está por debajo del nivel objetivo, el programa identifica las fuentes corriente arriba que el usuario ha especificado con propósitos de dilución, y añade agua equitativamente de todas estas fuentes. Entonces se repiten los cálculos de oxígeno disuelto. Este proceso continua hasta que el nivel objetivo se satisface [8].

La capacidad de la corriente para mantener una adecuada concentración de oxígeno disuelto, es uno de los aspectos más importantes a considerar cuando se calcula su capacidad de asimilación. Esta concentración depende principalmente de la reaeración atmosférica, fotosíntesis, respiración de plantas y animales, demanda bental de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, nitrificación, salinidad y temperatura. En este modelo se incluye las interacciones mayores: ciclos de nutrientes, producción de algas, demanda béntica de oxígeno, captación de oxígeno carbonoso, aireación atmosférica y sus efectos sobre el comportamiento del oxígeno disuelto. Las reacciones químicas y biológicas están representadas por un grupo de ecuaciones que contienen muchos parámetros del sistema;

algunos son constantes, otros variables espaciales, y algunos dependientes de la temperatura [9].

Para modelar los diferentes escenarios de calidad del agua de las corrientes, se consideran las condiciones de calidad del agua más críticas que se presentarían en ellas, y estas están dadas por el caudal mínimo que transita por éstas. El caudal mínimo considerado para modelar la calidad del agua, es el denominado caudal ecológico, ya que de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales [2], es el caudal mínimo que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema en las corrientes, para permitir el desarrollo natural. La determinación del caudal ecológico se realiza de acuerdo con la metodología establecida en el anteproyecto de Norma Mexicana [10] que especifica el método para calcular el caudal de conservación ecológica en corrientes superficiales, el cual fue elaborado por la Subdirección General Técnica de la Comisión Nacional del Agua. Para determinar el caudal ecológico de una corriente, se deben considerar los registros hidrométricos diarios promedio del caudal original de los años que se tenga información (periodo de cálculo), del tramo o tramos de corriente de los que se determinará el caudal mensual de conservación ecológica. Con los registros de los caudales promedios diarios se determina el caudal promedio mensual. Los valores promedio mensuales se toman como base para determinar el caudal promedio mensual de conservación ecológica, que deberá escurrir en el cauce, el cual se obtiene de multiplicar el valor del caudal promedio mensual por 0.10, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Q_{Ecoli} = 0.1 (Q_{Promi}) \quad (10)$$

donde  $Q_{Ecoli}$ : caudal de conservación ecológica,  $m^3/s$ , en el mes  $i$ ;  $Q_{Promi}$ : caudal promedio del mes  $i$ ,  $m^3/s$ .

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la determinación del caudal ecológico del río Tula, se tomaron en cuenta los registros hidrométricos del periodo 1993-2004. En la tabla

2 se muestran los resultados promedios de los caudales ecológicos.

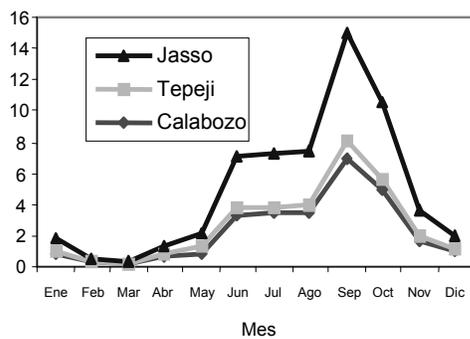
De acuerdo con los resultados se presentan los valores más pequeños del caudal ecológico en los meses de diciembre a febrero. Por su parte los valores del gasto ecológico igualmente presenta sus mínimos en los meses diciembre a marzo (figura 3).

Los valores de DBO variaron desde 1.16 a 486.81 mg O<sub>2</sub>/L; el oxígeno disuelto entre 1.52 y 5.82 mg/L, esto implica afectación para el desarrollo de la vida acuática en el río. Las medidas de tendencia central presentaron una diferencia considerable entre las estaciones de monitoreo, una desviación estándar de 128.15, muy elevada; se concluye que los valores centrales no son representativos de la distribución, lo cual es consistente, ya que los datos de DBO corresponden a 35 sitios de muestreo de cargas muy variables.

**Tabla 2.** Resultados de los valores de caudal ecológico del río Tula.

**Table 2.** Results of the values of ecological volume of the Tula river.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
Q <sub>prom</sub>	0.660	0.659	1.194	0.654	4.331	2.562
Q <sub>ecol</sub> =0.1Q <sub>pro</sub>	0.066	0.066	0.119	0.065	0.433	0.256
MES	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Q <sub>prom</sub>	1.008	0.911	2.243	4.841	1.386	0.621
Q <sub>ecol</sub> =0.1Q <sub>pro</sub>	0.101	0.091	0.224	0.484	0.139	0.062



**Figura 3.** Gasto ecológico promedio para los tramos estudiados del río Tula

**Figure 3.** Ecological cost average for the studied sections of the Tula river

Por lo anterior se deriva que, si bien existen muchos sitios muy contaminados, también se encontraron sitios con excelente calidad, con respecto a la materia orgánica biodegradable. Atendiendo a la escala de clasificación de calidad del agua con base en la DBO a los 5 días (Tabla 3) y utilizando los intervalos de calidad del agua como clases, se construyó el histograma de frecuencias que se muestra en la figura 4.

**Tabla 3.** Escala de clasificación de calidad del agua. Fuente: CONAGUA 2006. [11]

**Table 3.** Scale of classification of quality of the water. Source: CONAGUA 2006. [11]

CRITERIO	CLASIFICACIÓN	COLOR
DBO <sub>5</sub> < 3.0	Excelente No contaminada	AZUL
3.0 < DBO <sub>5</sub> < 6.0	Buena Calidad Aguas superficiales con bajos contenidos de materia orgánica biodegradable	VERDE
6.0 < DBO <sub>5</sub> < 30.0	Aceptable Con indicio de contaminación, con capacidad de delusión o con descargas biotratadas	AMARILLO
30 < DBO <sub>5</sub> < 120	Contaminada Aguas superficiales con descargas de aguas contaminadas no tratadas	NARANJA
DBO <sub>5</sub> > 120	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuertes descargas de aguas contaminadas municipales y no municipales	ROJO

Se determinaron solo 3 muestras con calidad excelente, 4 con buena calidad y 7 con calidad aceptable; por lo que el agua de 44.8% de las muestras van de calidad excelente a aceptable.

Es apreciable los niveles de disminución en los tramos III y IV y en particular en las estaciones de monitoreo en un mismo tramo. Como tramo de condiciones críticas se señala el tramo IV y seguidamente el tramo III (estación de monitoreo RTU5) y tramo II (RTE3), ya que para estos casos se encuentra el OD por debajo de 4 mg/L y por debajo del nivel requerido para vida acuática normal (5 mg/L).

Con base a los criterios de calidad de las aguas por los valores de pH, se puede señalar que la totalidad de las aguas del río Tula en los 50 km evaluados, cumple con los criterios ecológicos para riego agrícola y fuente de abastecimiento de agua potable, sin embargo se observó una tendencia hacia la basicidad originada por las descargas de aguas residuales vertidas a estos cuerpos receptores; las variaciones presentadas fueron de 7.45 a 8.34. La alcalinidad representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis.

Sin embargo, también se encontraron muestras con altas concentraciones de materia orgánica biodegradable, de las cuales 14 se encuentran contaminadas y 11 fuertemente contaminadas. Se pudo apreciar una disminución importante del oxígeno disuelto de 5.82 mg/L a 1.52 mg/L, lo anterior debido a las aportaciones de materia orgánica del río El Salto y el emisor central, que aportan las aguas residuales de la Ciudad de México y su zona conurbada.

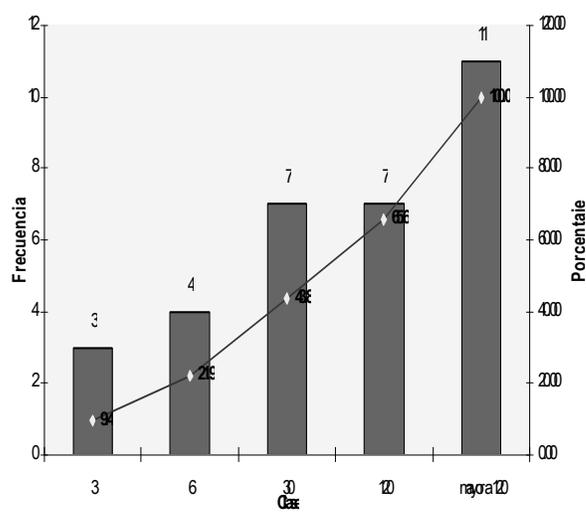
Lo anterior, implica también afectación al contenido de oxígeno necesario para el desarrollo de la vida acuática en el río. En la figura 5 se muestran los resultados de los análisis por tramos de la zona evaluada.

El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica es particularmente importante cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua. En este caso la alcalinidad rebasa el criterio ecológico de calidad del agua para fuente de abastecimiento de agua potable de 400 mg/L, en el tramo III, llegando a alcanzar en este tramo un valor máximo de 458.01 mg/L.

En el Tramo III sobre el afluente de Tepeji-Tula, se encontraron valores de conductividad por debajo de lo establecido en los CE-CCA para el uso en riego agrícola [12], no así en el tramo IV, donde ya se tiene aprovechamiento de las aguas en riego agrícola, por lo que se puede señalar que los Distritos de Riego 003 Tula y 100 Alfajayucan

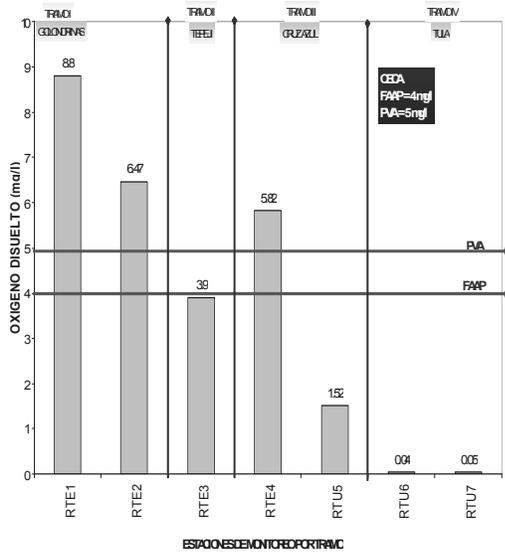
están regando con agua con valores de conductividad específica que rebasan los CE-CCA (figura 6).

El color de las aguas solo se monitoreó en la parte alta de cuenca del río Tula y en este caso en el Tramo IV, denominado Tula, representa un problema, ya que rebasa el límite establecido en los CE-CCA de 75 unidades de Pt-Co alcanzando valores de 100 y 160 como promedios en las estaciones de monitoreo RTU6 y RTU7. De manera similar y de acuerdo a los criterios de CE-CCA, las grasas y aceites deben estar ausentes para uso como fuente de abastecimiento de agua potable. En el río Tula se registraron valores hasta 0.9 mg/L en el Tramo II (en la Ciudad de Tepeji del Río) en tanto que en todos los tramos restantes se presentan cantidades muy altas de grasas y aceites llegando a un máximo de 18.1 mg/L en el Tramo III.



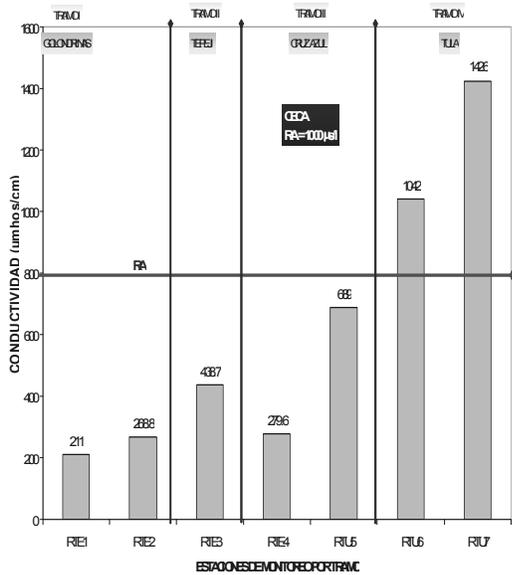
**Figura 4.** Histograma de frecuencias para la Demanda Bioquímica de Oxígeno en la zona de estudio. De los 35 puntos muestreados sólo 3 no presentaron DBO<sub>5</sub> en tanto 25 presentaron valores de 30 o mayores

**Figure 4.** Histogram of frequencies for the Biochemical Demand of Oxygen in the zone of study. Of 35 points only 3 they did not presented DBO<sub>5</sub> in 25 as much presented values of the 30 or greater ones.



**Figura 5.** Concentración de oxígeno disuelto en los tramos del río Tula en estudio.

**Figure 5.** Oxygen concentration dissolved in the sections of the Tula river in study.



**Figura 6.** Valores promedio de conductividad específica de las aguas en los tramos estudiados del río Tula.

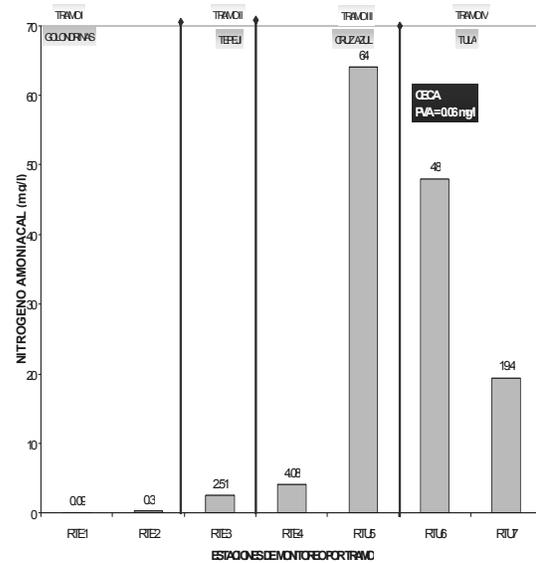
**Figure 6.** Values averages of specific conductivity of waters in the studied sections of the Tula river.

Los nitratos rebasan el límite establecido (<5.0 mg/L) para fuente de abastecimiento de agua potable, particularmente en el tramo III, llegando en este último a 6.24 mg/L, lo que refleja la influencia de las descargas municipales principalmente. Para el caso del Nitrógeno de

Nitritos se tiene que este contaminante rebasa el criterio ecológico de calidad del agua como fuente de abastecimiento de agua potable de 0.5 mg/L, particularmente en el Tramo II en donde está ubicada la Ciudad de Tepeji del Río, donde se alcanzó un valor de 1.304 mg/L (figura 7 a, b y c). La concentración de sólidos disueltos totales se rebasa en el Tramo III debido principalmente a la descarga de aguas residual del Emisor Central. De acuerdo a los criterios de CE-CCA no se deben exceder los 500 mg/L, tanto para fuente de abastecimiento de agua potable como para la actividad de riego agrícola. Para el tramo III en la estación de monitoreo RTU5 el valor promedio alcanzó valores de 632 mg/L, en tanto que para el tramo IV llegaron a valores de 1158 y 1444 mg/L para las estaciones de monitoreo RT6 y RTU7, respectivamente.

La concentración de sulfatos en la parte alta de la cuenca del río también sobrepasa el límite establecido para protección de la vida acuática en todas las estaciones de monitoreo (<0.005 mg/L). Los resultados variaron de 8.75 a 36.3 mg/L. Sin embargo, para riego agrícola, el límite de <130 mg/L, establecido en los CE-CCA [12], no se rebasa en ninguna estación.

Al igual que los nitratos, los fosfatos en grandes cantidades en los sistemas acuáticos también inducen la hiperfertilización.



**Figura 7. a)** Concentración de Nitrógeno Amoniaco en el río Tula.

**Figure 7. a)** Ammoniac Nitrogen concentration in the Tula river.

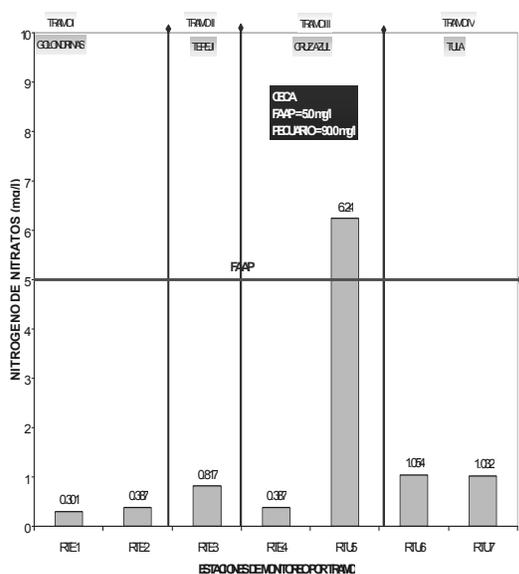


Figura 7. b) Concentración de Nitrógeno de Nitratos en el río Tula.

Figure 7. b) Nitrate Nitrogen concentration in the Tula river.

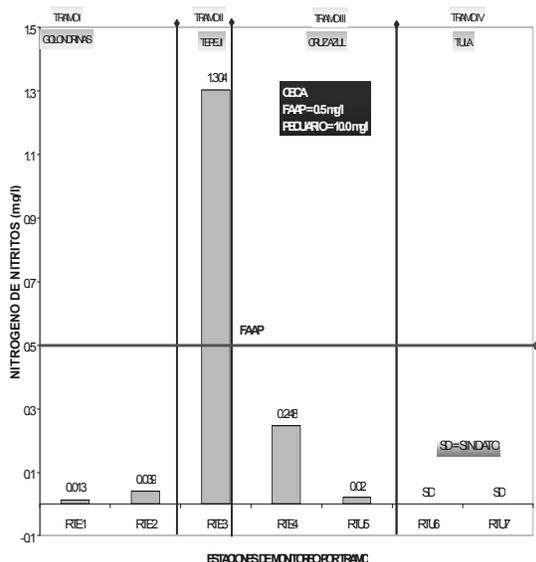


Figura 7. c) Concentración de Nitrógeno de Nitritos en el río Tula.

Figure 7. c) Nitrogen concentration of Nitrites in the Tula river.

En la figura 8 se observa que este contaminante rebasa en todas las estaciones medidas el criterio ecológico de calidad del agua tanto para fuente de abastecimiento de agua potable (<0.1 mg/L), como para la protección de la vida acuática

(<0.0001 mg/L). De nueva cuenta los tramos III y IV resultaron los más críticos.

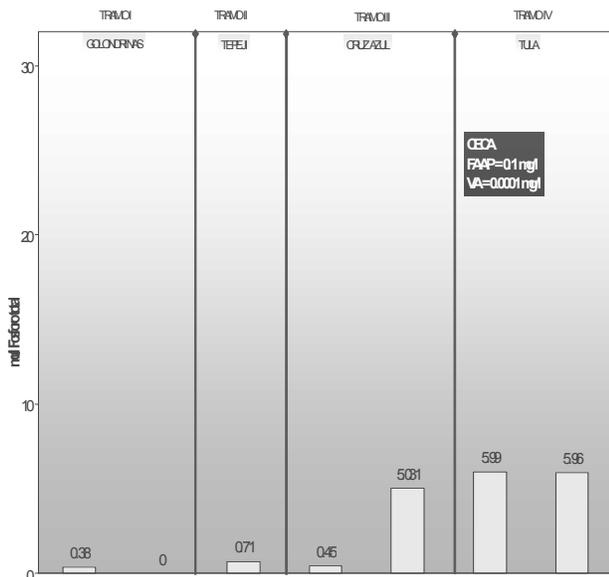
La concentración de las sustancias activas al azul de metileno (SAAM) representa un problema también para la operación de la infraestructura hidráulica de los Distritos de Riego 03 y 100. En los tramos III y IV, se rebasa el límite establecido en los CE-CCA para protección de la vida acuática (<0.1 mg/L) en las estaciones de monitoreo después de recibir descargas de aguas residuales de origen municipal [12]. Con respecto a los metales pesados, si bien no se rebasa el criterio ecológico de calidad del agua, para el cadmio (<0.01 mg/L), cromo y plomo (<0.05 mg/L); debe señalarse que con referencia al plomo, considerarlo para fuente de abastecimiento de agua potable se está muy cerca del límite en el Tramo III Cruz Azul en la estación de monitoreo RTU5, lo que indica la influencia contaminante del Emisor Central; de forma análoga a los casos anteriores, resultan los tramos III y IV los más afectados.

Otro parámetro de suma importancia y que se encuentra fuera de los límites establecidos es el nitrógeno amoniacal (<0.06 mg/L), ya que se registraron valores en la corriente que van de 0.09 a 64 mg/L, elevados para protección de la vida acuática.

Los nitratos y nitritos por su parte, corresponden a las formas oxidadas del nitrógeno, su importancia en cuerpos de agua de debe a que es asimilable por las algas y por lo tanto en grandes cantidades induce la hiperfertilización, y por ende la proliferación de grandes cantidades de malezas acuáticas, tales como el lirio, algo como lo que sucede en la presa Endhó.

Otro metal contaminante que puede constituir un problema lo es el hierro, sobre el cual se puede señalar que ningún tramo cumple con el criterio de fuente de abastecimiento de agua potable y solo los tramos I y II, sobre el tramo Golondrinas-Tepeji, cumplen con el criterio para protección de la vida acuática, los tramos restantes rebasan el criterio para riego agrícola, teniendo el valor máximo en el último tramo (tramo IV) de 7.4 mg/L. Para el caso del Manganeso, éste rebasa el criterio ecológico de 0.1 mg/L para fuente de abastecimiento de agua potable también en los

Tramos III y IV alcanzando en el Tramo III un valor máximo de 0.28 mg/L. Otro contaminante encontrado en el río Tula para el Tramo I Golondrinas fue el mercurio, que se encontró a una concentración de 0.0008 mg/L y en el Tramo III Cruz Azul se obtuvo como promedio una concentración de 0.0009 mg/L, ambas concentraciones rebasan los criterios ecológicos para fuente de abastecimiento de agua potable, protección de la vida acuática e incluso para uso pecuario.



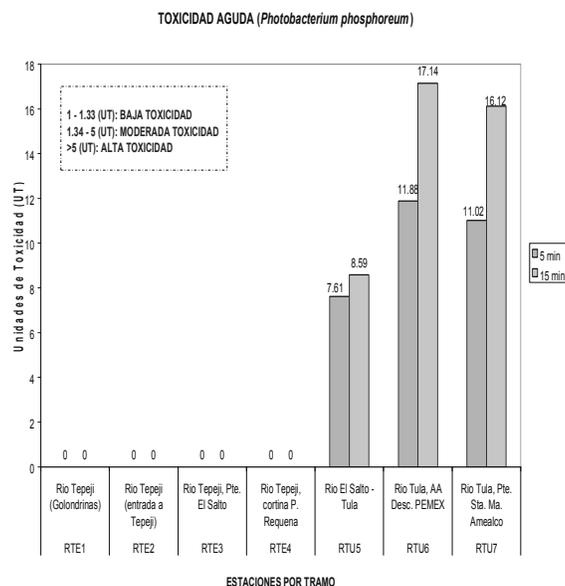
**Figura 8.** Concentración de Fósforo Total en el río Tula.

**Figure 8.** Total Phosphorus concentration in the Tula river.

La condición microbiológica en el agua del río, denota un severo problema de tipo antropogénico, ya que de acuerdo a los CE-CCA, a lo largo de prácticamente toda la corriente el agua no alcanza a satisfacer la calidad requerida para riego agrícola, debido a las altas concentraciones de coliformes fecales.

El límite establecido en los CE-CCA es de 1,000 NMP/100 ml y las concentraciones en las estaciones de monitoreo, excepto en la estación RTE1 que dicho parámetro no es rebasado, los valores van desde  $2.1 \times 10^4$  hasta  $2.40 \times 10^{11}$  NMP/100 ml. Si bien, los CE-CCA no incluyen un valor para la Demanda Bioquímica de Oxígeno, (DBO) podremos utilizar la escala de clasificación de la calidad del agua con base en la DBO<sub>5</sub> (5 días) emitida por la Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, de la CONAGUA; con base en esta escala de referencia tenemos que solo en el Tramo I tenemos agua de calidad aceptable con valores de DBO<sub>5</sub> de 4.63 mg/L, en el caso de los Tramos III y IV, la condición del agua en el río Tula va de contaminada a muy contaminada, con valores de DBO<sub>5</sub> que alcanzan los 384 mg/L. Es importante señalar que si bien en el Tramo II tenemos un valor de DBO<sub>5</sub> de 3.3 mg/L en este mismo tramo ingresa al río Tula las aguas residuales del Emisor Central lo que eleva la DBO<sub>5</sub> en el tramo hasta 170 mg/L.

Otra información importante, no regulada por la normatividad actual es la toxicidad, que da información con un enfoque global del impacto de las actividades antropogénicas en la salud del cauce. Se utilizó el analizador de toxicidad Microtox, con una bacteria luminiscente y no patógena de la especie *Photobacterium phosphoreum*; que emite luz como mecanismo de liberación de energía en el transcurso normal de su metabolismo y esa luz emitida es una medida de la actividad metabólica de las bacterias. Cuando se exponen a una muestra tóxica, la emisión de luz disminuye de forma proporcional a la toxicidad de la muestra. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9, donde se puede observar nuevamente el impacto de la descarga de aguas residuales del Emisor Central y las descargas municipales de Tula, donde influyen también las provenientes de las industrias.



**Figura 9.** Resultados promedio de evaluaciones de toxicidad medida en el río Tula.  
**Figure 9.** Results average of evaluations of toxicity measured in the Tula river.

En la tabla 4, se muestra la problemática general de la calidad de las aguas del río Tula, descrita en las gráficas anteriores, agrupando los resultados con respecto a los siete tramos o zonas en que se dividió el río para su clasificación. La mayor cantidad de materia orgánica biodegradable y no biodegradable es aportada por la descarga del Emisor Central, en la estación de monitoreo RTU5, que es la descarga sin tratamiento de la Ciudad de México y su Zona Conurbada, con 0.45 y 1.23 t/d. El Emisor Central es el principal aportador de contaminantes al cauce, provocando la sobresaturación del mismo. Asimismo, las descargas de aguas residuales provenientes del municipio de Tula de Allende, sin tratamiento alguno, se suman a la descarga anterior, con una disminución importante del oxígeno disuelto, sin embargo debido a las características propias del cauce, la cantidad de oxígeno disuelto implica que aun en las condiciones del río, durante su trayecto se puede favorecer la capacidad de autodepuración.

Para representar la calidad del agua se determinaron las medianas de DBO, en cada sitio de muestreo, tanto en el cuerpo de agua como en las descargas de aguas residuales. En la tabla 5 se incluyen los valores de las medianas determinadas

para cada estación de monitoreo. Como se puede apreciar en las estaciones RTU 5, 6 y 7 respectivamente se confrontan los principales problemas de contaminación y ello asociado a la descarga del Emisor Central a partir del Tramo III, presa Requena.

Los resultados de la calibración del modelo matemático (Brown et Barnwell, 1987) de calidad del agua y la calibración de los diferentes parámetros, gasto o caudal, DBO, oxígeno disuelto, DQO, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, nitrógeno total, fósforo orgánico, fósforo disuelto, y fósforo total, mostraron las mismas tendencias en las estaciones RTU 5, 6 y 7, siendo éstas las que confrontan los principales problemas de contaminación. A manera de ejemplo se muestran las figuras 10 a y b, que corresponden a los incrementos de la  $DBO_5$  y la disminución notable del oxígeno disuelto. Se observan los altos valores a partir del elemento diferencial 13 y siguientes para la  $DBO_5$  y su creciente elevación, así como la notable disminución del oxígeno disuelto. En todos los casos se corrobora que a partir de los elementos diferenciales 13 en adelante se producen las grandes variaciones o saltos y se corresponden con el tramo III a partir de las descargas del emisor central.

**Tabla 4.** Problemática general de calidad del agua en cada zona de la corriente del río Tula.**Table 4.** Problematic general of quality of the water in each zone of the current of the Tula river.

ZONA	PROBLEMÁTICA EN LA CORRIENTE CON RESPECTO A USOS ACTUALES Y POTENCIALES	PROBLEMÁTICA EN LAS DESCARGAS CON RESPECTO AL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-001
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Concentraciones de sulfatos que rebasan el criterio para protección de la vida acuática.</li> <li>✓ Concentraciones de mercurio altas, es recomendable verificar este dato.</li> <li>✓ Presencia de coliformes fecales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ No existen descargas de aguas residuales.</li> <li>✓ Toxicidad moderada</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Concentraciones de sulfatos que rebasan el criterio para protección de la vida acuática.</li> <li>✓ Concentraciones de nitritos en incremento.</li> <li>✓ Presencia de coliformes fecales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ DBO<sub>5</sub> alta (&gt;150 mg/L para RA)</li> <li>✓ Toxicidad moderada y alta, sobre todo en la descarga municipal de Tepeji</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Concentraciones de sulfatos que rebasan el criterio para protección de la vida acuática.</li> <li>✓ Concentraciones de nitratos en incremento.</li> <li>✓ Concentraciones altas de nitrógeno amoniacal (&gt;0.05 mg/L para FAAP)</li> <li>✓ Elevado cloro residual a partir de la descarga del emisor central (&gt;0.011 mg/L para PVA)</li> <li>✓ Cantidad de coliformes fecales excesivamente elevada a partir de la descarga del emisor central.</li> <li>✓ Concentraciones de grasas y aceites, SAAM, Fe, Pb, Mn y Sólidos Disueltos Totales que se incrementan en forma sustancial a partir de la descarga del emisor central.</li> <li>✓ Demandas químicas y bioquímicas de oxígeno elevadas.</li> <li>✓ Disminución excesiva del oxígeno disuelto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ DBO<sub>5</sub> alta (&gt;150 mg/L para RA)</li> <li>✓ Toxicidad muy elevada</li> <li>✓ Fósforo inorgánico, fósforo inorgánico disuelto, ortofosfatos, nitrógeno amoniacal, nitrógeno orgánico, nitratos, cloruros, sustancias activas al azul de metileno, sodio, aluminio, cromo hexavalente, hierro, magnesio, manganeso, plata, fluoruros, boro, selenio, toxicidad, fenoles totales, dimetil ftalato, dietil ftalato, tolueno, p-isopropiltolueno, Aldrin, lindano, endosulfan I, endosulfan sulfato, Endrin, Endrin aldehído, Endrin cetona, 4,4'DDD, beta BHC.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Concentraciones de sulfatos que rebasan el criterio para protección de la vida acuática.</li> <li>✓ Concentraciones de nitratos en incremento.</li> <li>✓ Concentraciones altas de nitrógeno amoniacal (&gt;0.05 mg/L para FAAP)</li> <li>✓ Elevado cloro residual a partir de la descarga del emisor central (&gt;0.011 mg/L para PVA)</li> <li>✓ Cantidad de coliformes fecales excesivamente elevada a partir de la descarga del emisor central.</li> <li>✓ Concentraciones de grasas y aceites, SAAM, Fe, Pb, Mn y Sólidos Disueltos Totales que se incrementan en forma sustancial a partir de la descarga del emisor central.</li> <li>✓ Demandas químicas y bioquímicas de oxígeno elevadas.</li> <li>✓ Disminución excesiva del oxígeno disuelto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ DBO<sub>5</sub> alta (&gt;150 mg/L para RA)</li> <li>✓ Toxicidad muy elevada</li> </ul>

FAAP= Fuente de abastecimiento de agua potable

PVA= Protección de la vida acuática

RA= Riego agrícola

UT= Unidades Toxicológicas

**Tabla 5.** Valores de las medianas de DBO<sub>5</sub> determinadas para cada estación de monitoreo, en el cuerpo de agua y sus descargas**Table 5.** Medium values of of DBO<sub>5</sub> determined for each station of monitory, in the water body and its unloading

ESTACION	DESCRIPCION	MEDIANA
RTE1	Rio Tepeji (Golondrinas)	3
RTE2	Rio Tepeji (entrada a Tepeji)	3
RTE3	Rio Tepeji, Pte. El Salto	10
RTE4	Rio Tepeji, cortina P. Requena	2
RTU5	Rio El Salto - Tula	119
RTU6	Rio Tula, AA Desc. PEMEX	120
RTU7	Rio Tula, Pte. Sta. Ma. Amealco	92

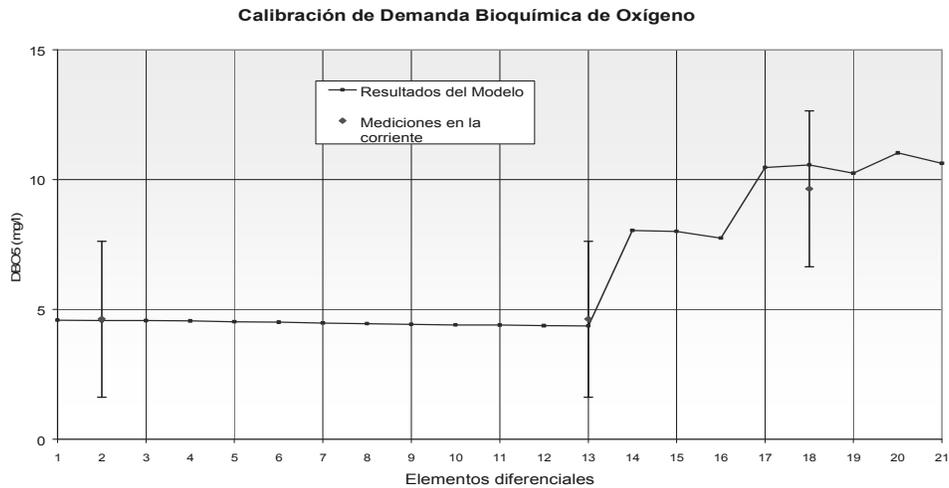


Figura 10. a) Resultados de la calibración por modelación de la DBO<sub>5</sub> de las aguas.

Figure 10. a) Results of the calibration by modelling of the DBO<sub>5</sub> of waters.

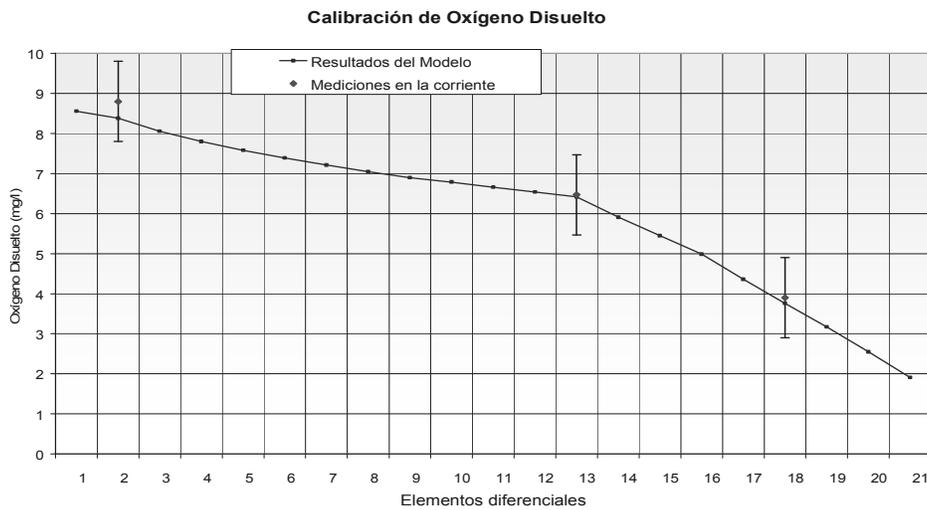


Figura 10. b) Resultados de la calibración por modelación del Oxígeno disuelto de las aguas.

Figure 10. b) Results of the calibration by modelling of the dissolved Oxygen of waters

#### 4. CONCLUSIONES

Los recursos hídricos del río Tula han sufrido un deterioro en su calidad con motivo de las descargas de aguas residuales provenientes de procesos industriales y asentamientos humanos, que vierten toneladas al día de contaminantes más contaminación microbiológica que impiden el uso sustentable del agua. Cabe aclarar que toda la

infraestructura de saneamiento existente en la zona de estudio es de origen industrial o de servicios, ya que no existe infraestructura de saneamiento municipal. Se determinó la

capacidad de asimilación y dilución de contaminantes mediante modelación matemática que simuló las cantidades de éstos que reciben los caudales y se determinaron los que puede recibir

para alcanzar las metas establecidas y recuperar gradualmente la calidad del agua para los usos actuales y potenciales.

En la cuenca existe una alta precipitación y escurrimiento así como una alta demanda de uso del agua, y una importante evaporación e infiltración que provoca que el volumen escurrido resultante, sea insuficiente para su autodepuración natural. El reuso de las aguas residuales sin tratar en las actividades agrícolas constituye una amenaza para la salud pública y la preservación del ecosistema, con el consiguiente desequilibrio ecológico que, a su vez conlleva daños irreversibles reflejados en la pérdida de calidad de vida, la afectación de los usos del agua y a otros recursos susceptibles de ser aprovechados. Se determinó que aún con el cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996 no es suficiente para alcanzar la calidad del agua requerida para los usos de dichos cuerpos de agua, al menos en los tramos comprendidos entre la presa Requena y la presa Endhò.

## 5. REFERENCIAS

- [1] SARH. 1980. Evaluación del Impacto Ambiental del Transporte y Uso de las Aguas Residuales del Área Metropolitana del Valle del México, en la Agricultura. México.
- [2] CNA. Comisión Nacional del Agua. 1998. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. 3era Edición. México.
- [3] CICERO F. PABLO, CISNEROS R. ADRIANA, LACY T. RODOLFO. 1980. Evaluación del Impacto Ambiental causado por la Irrigación con Aguas Negras en el Distrito de Riego 03. Universidad Autónoma Metropolitana. Tesis de Maestría.
- [4] CNA. Comisión Nacional del Agua. 2003. Inventario Nacional de Descargas de aguas residuales Industriales. Subdirección General Técnica. Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México.
- [5] DOWNS, T.; CIFUENTES, E.; SUFFETT, M. 1999. Risk screening for human exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspectives*. 107, No. 7: 553-561.
- [6] ROJAS GARCÍA, J. A., 2002. Simulación de la calidad del agua de corrientes superficiales para la determinación de límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales. Tesis. UNAM, México.
- [7] QUAL2E. 1999. Windows Interface Uses Guide, United States Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Standards and Applied Science Division, 401 M Street, SW, Washington, DC 20460.
- [8] BROWN, L.C., BARNWELL, T. O., 1987. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E UNCAS: Documentation and User Manual. EPA-600/3-87/007. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- [9] SCAVIA, D., Y PARK, R. A., 1976. Documentation of Selected Constructs and Parameter Values in the Aquatic Model CLEANER, *Ecological Modeling*, Vol. 2.
- [10] NOM-001-SEMARNAT-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. (Diario Oficial de la Federación del 6 de enero de 1997).
- [11] CNA. Comisión Nacional del Agua, 2004, Red Nacional de Monitoreo, SGT-GSCA, México.
- [12] CNA. Comisión Nacional del Agua, 2006. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, México.