

1.INTRODUCCION

El agua solo es pura en estado de vapor y empieza a acumular impurezas tan pronto como ocurre la condensación.

En las gotas que forman las nubes se disuelven gases: oxígeno, bióxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno; cuando estos gases se disuelven en el agua se producen ácidos minerales, dando lugar a la lluvia ácida alterando de esta forma las características del agua aún antes de tener contacto con la plataforma continental, pudiendo depositarse sobre esta ya con sus características de calidad alteradas.

Así mismo, al llegar a la superficie de la tierra el agua se percola dentro del suelo, convirtiéndose en agua subterránea o bien, escurre por la superficie en forma de arroyos, corrientes y ríos. Los minerales se disuelven, tanto en el agua superficial como en la subterránea; esta última tiene una mayor concentración de sales disueltas ya que existe un mayor contacto con el suelo.

Las impurezas químicas más comunes que se detectan en el agua en cantidades importantes son: calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, cloruros, sulfato, nitrato y silicatos. También se encuentran rastros de otros iones como: arsénico, plomo, cobre, hierro, manganeso y una amplia gama de compuestos orgánicos.

Toda comunidad produce residuos, tanto líquidos como sólidos. La parte líquida -aguas residuales- procede esencialmente del agua suministrada a la

comunidad después de haber sido contaminada por los diversos usos a que ha sido sometida. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, las aguas residuales pueden definirse como una combinación de líquidos o aguas portadoras de residuos procedentes de residencias, instituciones públicas, así como de centros comerciales e industriales, a las que eventualmente, pueden agregarse aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

En nuestro país, no se ha efectuado una planeación racional del recurso, por lo que es necesario establecer políticas que promuevan y mejoren los programas encaminados a un mejor aprovechamiento del recurso hidráulico, y de esta manera acrecentar y mantener el desarrollo social y económico. La carencia de este tipo de políticas, durante decenios, es la causa de que actualmente se tenga un inadecuado aprovechamiento del recurso, y que los problemas de contaminación en los cuerpos de aguas nacionales se agudicen (Munive de León, 1997).

Las descargas no controladas de las aguas residuales, municipales e industriales sin tratar, o pobremente tratadas y más recientemente los escurrimientos de las aguas utilizadas en el riego agrícola, implican la contaminación continua de las aguas, haciendo cada vez más difícil su aprovechamiento para usos múltiples.

La intervención del hombre puede modificar su calidad y no se piense que esto ocurre siempre en forma negativa, porque si en estado natural el agua no cumple para su uso, puede pasar por ciertos procesos que la convierten en útil; estos son los denominados procesos de tratamiento.

Pero lo que ocurre con demasiada frecuencia, es el cambio que el hombre produce en la calidad del agua, con un decremento, y esto, se debe al volumen de desechos en relación con la capacidad de dilución y de autopurificación de los cuerpos receptores, ya que anteriormente se seguía la práctica tan criticable actualmente, de verter los efluentes directamente sin tratamiento, a las corrientes.

Lo que ocurre es que se ha roto el equilibrio ecológico que gobierna esos fenómenos; interviniendo en esto dos grandes factores: 1) el incremento poblacional, con la consecuente mayor demanda del líquido y 2) el escaso volumen disponible de agua con buena calidad

Todas las aguas residuales afectan el ecosistema de una corriente. Cuando este efecto es suficiente para hacer que la corriente no sea aceptable para su mejor utilización, se dice que esta contaminada.

Un método para mantener la calidad de un río, se basa en establecer una clasificación de calidad y regular las descargas para mantener esta calidad o clasificación establecida previamente.

El término autopurificación está definido como el restablecimiento, por medios naturales del estado de pureza de un río después de una descarga de materia contaminante en él.

Para determinar el grado de autopurificación de cualquier cuerpo de agua es necesario hacer una serie de estudios y análisis, aplicando modelos matemáticos como herramientas analíticas que permiten simular el

comportamiento del cuerpo receptor y de esta forma determinar su grado de contaminación, capacidad de autopurificación, simular condiciones especiales y finalmente predecir el comportamiento de la corriente.

La finalidad de lo anterior, es fijar los parámetros de calidad que deben reunir las descargas de aguas residuales que se vierten en el cuerpo receptor, de acuerdo a la capacidad de asimilación y dilución inherentes al mismo, de tal forma que se mantenga su calidad para los usos que se requieran en la actualidad y provocar una mejoría continua para incrementar los usos.

1.1 Antecedentes Generales

El estado de Tlaxcala, a pesar de ser el más pequeño en territorio de los que comprende el país (representa el 0.2 % de la superficie del país) ha tenido un importante desarrollo industrial, basado principalmente en las fábricas textiles.

La población total del estado es de 883,630 habitantes; contando con 370 industrias manufactureras, 378 dedicadas a la construcción y 369 mineras. Con respecto al producto interno bruto comparado con el nacional, se tiene un 26.87 % en productos alimenticios, bebidas y tabaco; 18.24 % en textiles, prendas de vestir e industria del cuero; 26.70 % en sustancias químicas, derivados del petróleo, productos de caucho y plástico y un 17.46 % en productos minerales no metálicos, excepto derivados del petróleo y carbón; entre los más importantes.

El desarrollo industrial del estado representa grandes beneficios económicos para los habitantes, pero dadas las características de los mismos, estos se llevan a cabo afectando los diferentes elementos del ambiente. Al ser el río Zahuapan el principal cuerpo receptor, se ha visto afectado de manera importante por las descargas tanto industriales como municipales. De esta forma con el crecimiento de la industria y la población, la contaminación generada ha ido en aumento por lo que los problemas a este cauce se agravan con el paso del tiempo.

La mayor parte (3051.370 km.²) del estado en sus porciones centro y sur queda comprendida dentro de la región hidrológica “Río Balsas”, conocido también como Atoyac, Mezcala o Zacatula, este es uno de los más importantes ríos de la República Mexicana. Nace unos 40 km. al norte de la ciudad de Tlaxcala, Tlax.; en los límites de este estado con el de Puebla. En sus orígenes se llama río Zahuapan y al confluir con el Atoyac, unos 10 km. al norte de Puebla, toma este último nombre.

El río Atoyac que da origen al Balsas, se forma a partir de los escurrimientos que bajan por vertiente norte del Iztaccihuatl desde una altitud de 4000 m.s.n.m. en los límites de los estados México-Puebla.

En la cuenca Puebla-Tlaxcala, existe un desarrollo industrial importante. En lo que se refiere a la agricultura, la cuenca incluye el distrito de riego 030 Valsequillo con 345,340 has. regadas y al Atoyac-Zahuapan con 6,029 has.

regadas. Debe mencionarse que esta es la región más densamente poblada de la cuenca.

Sus afluentes principales son el Río Atoyac-San Martín Texmelucan, el lago Totolzingo y el Río Zahuapan.

Este último es la principal corriente de Tlaxcala y cuyo estudio en el presente trabajo, tiene la finalidad de conocer la capacidad de asimilación y dilución del río Zahuapan mediante la aplicación de un modelo matemático (SICLACOR modificado en una hoja de cálculo en excel 6.0 de Microsoft), así como determinar los valores máximos permisibles que deberán cumplir las descargas de aguas residuales que se viertan en la corriente con el fin de establecer líneas de acción para conservar y/o en su caso recuperar el río Zahuapan.

1.2. Justificación.

La explotación de los recursos hidráulicos debe realizarse en forma racional en un marco de desarrollo sustentable, a fin de no provocar desequilibrios ecológicos y sobreexplotación del recurso, por lo que es necesario controlar las descargas de aguas residuales que se vierten a los cuerpos receptores, y una de las etapas para lograrlo es contar con Estudios de Clasificación de los cuerpos receptores que nos indique la calidad de sus aguas, así como la calidad de las aguas residuales que se reciben, su localización y su influencia en otros cuerpos receptores (CNA, 1992)

Es importante por todo lo que conlleva a la preservación de las corrientes superficiales, no perturbar los mecanismos de las mismas, por lo que las descargas de aguas residuales tanto municipales como industriales, deberán tener características tales que la afectación al cuerpo de agua sea mínima.

Con la información de la Red Nacional de Monitoreo en lo que respecta a calidad del agua, se evaluaron las condiciones que prevalecen en las principales cuencas del país, mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) que toma en cuenta 16 parámetros. Se concluyó que prácticamente todos los cuerpos de agua importantes tienen grandes problemas de contaminación. Se considera que por su nivel de contaminación se requiere atención prioritaria, en las siguientes cuencas: Pánuco, Lerma, Balsas,Mayo y Bajo Bravo. (Programa Hidráulico 1995-2000)

Para poder recuperar y preservar el Río Zahuapan, es indispensable realizar estudios específicos y sistemáticos, para determinar cual es la capacidad del cuerpo de agua y cuales son las restricciones para las descargas de cada uno de los aportadores, debiéndose establecer para las diferentes condiciones del cuerpo receptor. Asimismo para la eficiente operación de las plantas de tratamiento existentes en el estado que son alimentadas por el cauce del río.

El Gobierno Federal, ha establecido planes y programas de desarrollo para la población, cuyos objetivos en relación al factor agua, son; conocer de cuanta se dispone en el país, de que calidad, donde se localiza y a que usos se destina, con el fin de reglamentar su conservación y manejo en forma racional y adecuada en beneficio de la población.(LAN, 1992)

La clasificación de las corrientes superficiales permitirá conocer su capacidad de dilución y asimilación y las cargas de contaminantes que éstas puedan recibir. Así también, verificar si la calidad del agua es adecuada para los usos actuales y potenciales, de no ser así, regular las fuentes de contaminación que se viertan en estas.

El estudio de clasificación de la corriente servirá para elaborar las declaratorias de clasificación, las cuales serán la base técnico-jurídica en las que se basará la CNA conforme al Artículo 89 de la Ley de Aguas Nacionales, para otorgar los permisos a los responsables de las descargas de aguas residuales, que se viertan o verterán a ella.

1.3 Objetivos.

Generales.

-Determinar la capacidad de asimilación y dilución de la corriente y las cargas de contaminantes que ésta pueda recibir; mediante información de calidad del agua.

- Determinar los parámetros y sus valores máximos permisibles que deberán cumplir las descargas de aguas residuales, que se viertan o verterán a la corriente

Particulares.

- Determinar las características y condiciones de la corriente, obtenidas en laboratorio y campo, y evaluadas mediante la aplicación de expresiones matemáticas.

- Determinar las metas de calidad del agua de la corriente, de acuerdo a su uso actual y potencial, y los plazos (corto, mediano y largo) para alcanzarlas.

- Establecer la factibilidad técnica de las descargas para cumplir con los valores de los parámetros fijados.

- ✓ - Definir las estrategias generales de las líneas de acción para restaurar o mejorar el Río Zahuapan.

- ↳ Identificar los usos actuales del río Zahuapan, así como las fuentes de contaminación de la corriente.

- Clasificar la corriente con base en los diferentes usos del agua que se tienen a lo largo de su recorrido, considerando los actuales y potenciales.

2. REVISION BIBLIOGRÁFICA

2.1 La reología.

(Morales Juárez, 1996).

Los primeros estudios reológicos fueron realizados en la segunda mitad del Siglo XIX en el río Croult, cerca de París, por el Sr. Gerardin quien encontró condiciones nocivas resultantes de descargas de desechos orgánicos. Hacia el año de 1884 tuvieron lugar estudios en el río Illinois de los Estados Unidos del Norte de América, efectuados por Kofoid.

Los países que han dado la importancia necesaria al estudio de la contaminación de corrientes superficiales son pocos, sin embargo, los conocimientos obtenidos por los países más desarrollados son amplios y complejos y desde que su difusión se incrementó en los países que no habían tomado en cuenta el aspecto de contaminación de las aguas, se logró que éstos pudieran aprovechar experiencias y estudios muy valiosos, inclusive hasta la fecha.

Con el desarrollo de la Ecología y Microscopía se ha llegado a una mejor comprensión en el estudio de la autodepuración de corrientes.

2.2 Condiciones físicas, químicas y biológicas que afectan a una corriente.

La corriente de agua de un río proviene de las precipitaciones pluviales en la cuenca de recogida de las aguas. Las avenidas se presentan merced a la lluvia o a la fusión de nieves. En los períodos de secas la corriente se mantiene por el agua de los lagos, pantanos o por almacenamientos subterráneos.

El escurrimiento de una cuenca es la cantidad de agua que es captada por dicha cuenca. Una corriente fluvial es la parte visible del escurrimiento, incluye al agua que entra en el cauce, procedente del terreno, así como la que es conducida transitoriamente en la cuenca y evacuada posteriormente a la corriente fluvial.

Los factores que afectan a una corriente son numerosos y varían de acuerdo a la localización geográfica de la misma.

A continuación se exponen las condiciones físicas, químicas, y biológicas más importantes.

2.2.1 Factores físicos

Los factores físicos más importantes en una corriente por los efectos que producen son: temperatura, insolación, turbiedad, movimiento del agua, la sedimentación y los sedimentos bentales, así como la topografía.

A) Temperatura .¹ Se entiende por temperatura a la energía cinética de las partículas de una sustancia, que en nuestro caso es el agua. La temperatura de una corriente varia de acuerdo con las estaciones del año y según sea el valor de ella se producen variaciones en el plancton (todos los microorganismos vivos que se encuentran en suspensión) del río.

En las corrientes existe una estratificación térmica cuya diferencia vertical es afectada por el movimiento del agua, es por esto que es más observable en los cuerpos de agua estancada, como lagos; sin embargo la estratificación térmica en una corriente puede ser evidente en los remansos o lugares donde la velocidad sea baja.

Las lecturas de temperatura se toman con termómetros especiales. Temperaturas inferiores a la normal indica la incorporación de agua subterránea o superficial.

A temperaturas más altas (hasta 60°C aprox.) la actividad biológica es mayor, de ahí que se haga una diferenciación entre las bacterias saprófitas del tipo mesofílico, termofílico y psicofílico.

Las lecturas de temperatura se aplican en los cálculos de las distintas formas de alcalinidad y en estudios de estabilidad y saturación con respecto al carbonato de calcio.

B) Insolación .- Las condiciones de luz en las corrientes son distintas de las que privan en aguas estancadas, debido a que la materia en suspensión no se sedimenta tan rápidamente.

En corrientes que arrastran mucha materia en suspensión la turbiedad disminuye la luz y como consecuencia la fotosíntesis se ve disminuida. La estructura de la luz producida por turbiedad también está sujeta a fluctuaciones que dependen de la cantidad de agua superficial recibida en la corriente que afectan el poder de arrastre del agua.

La cantidad e intensidad de luz que recibe una corriente varía también con la orientación de la misma, su localización geográfica y estación del año.

Debido al proceso fotosintético queda almacenada cierta cantidad de energía en vegetales como las algas, que contienen clorofila.

Absorción de la Luz. La energía solar dirigida a una masa de agua no penetra en su totalidad por la superficie de ésta, sino que alguna es reflejada aumentando esta en cantidad a medida que el ángulo de incidencia va siendo más agudo. La reflexión aumenta cuando el viento provoca ondulaciones en la superficie del agua.

Los investigadores James y Birge realizaron estudios sobre la absorción de la luz por el agua de los lagos y dieron a conocer valores de velocidad proporcional y longitudes de onda próximas al valor medio para cada color del espectro visible.(Morales Juárez 1996)

La distribución espectral de la energía solar cambia conforme aumenta la profundidad. Debido al color verdadero (sustancias disueltas) y al color aparente (sustancias en suspensión) que contienen las aguas naturales.

C) Turbiedad.- La turbiedad del agua es la apariencia oscura que está presente debido a la presencia de sólidos suspendidos, tanto orgánicos como inorgánicos, entre los que se puede citar la arcilla, limo, materia orgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos.

La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica de una muestra de agua que hace que los rayos luminosos se dispersen y absorban en lugar de que se transmitan en línea recta a través de ella.

Los intentos para relacionar la turbiedad con la concentración en peso de los sólidos suspendidos no son prácticos, porque el tamaño, forma e índice de refracción de las partículas son ópticamente de menor importancia.

Las corrientes presentan fluctuaciones grandes de turbiedad sobre todo en época de avenidas.

Tanto el reoplancton como las plantas sumergidas son afectadas por la turbiedad, valores pequeños de la misma no afectan al proceso fotosintético excepto a profundidades grandes o valores de turbiedad mayores de 50 mg/l. en

los que la luz puede ser cortada casi completamente, excepto en los estratos cercanos a la superficie.

Como se puede deducir de lo expuesto, la calidad y carácter de los sólidos suspendidos varía de acuerdo con la estructura geológica de la cuenca y en aguas que han sido contaminadas, con el volumen y naturaleza de los desechos descargados en la corriente.

Los valores de turbiedad se expresan numéricamente con unidades que corresponden a turbiedades producidas por el equivalente en mg/l de sílice finamente dividido. No todo el material que produce turbiedad tiende a depositarse por gravedad. Las partículas inorgánicas forman bancos de lodos que se descomponen produciendo compuestos orgánicos e inorgánicos, los cuales se integran al agua. Los lodos bentales proporcionan abrigo a gusanos, larvas y formas más evolucionadas de vida animal.

D) Movimiento del Agua.- La acción del oleaje que es una consecuencia de la acción del viento no es tan proporcionada en las corrientes como en los grandes lagos.

Las zonas amplias de los ríos y sus recodos están sujetos a disturbios constantes en su superficie que son transmitidos a los estratos inferiores, sin embargo los efectos dinámicos y los producidos por las corrientes son de mayor importancia.

Condiciones moderadas de velocidad de escurrimiento permiten que los procesos vitales de la mayoría de los organismos unicelulares continúen prácticamente iguales que en aguas estancadas, sin embargo las formas filamentosas y adheridas de algas son afectadas considerablemente.

En el caso de escurrimiento turbulento los organismos más frágiles son destruidos y sobreviven los más resistentes; de ahí se desprende que existan especies distintas en las cercanías de la ribera de los ríos a las que viven en su parte central; así mismo la distribución de velocidades en la sección transversal de una corriente está reflejada por el desarrollo de organismos que se presentan en distintas partes de la corriente.

2.2.2 Alteraciones Químicas

Las alteraciones químicas en el agua son producidas por compuestos químicos vertidos, y son quizá los más importantes y los más comunes, tanto por los efectos que producen como por las consecuencias funestas que acarrearán, estos compuestos químicos causantes de las alteraciones pueden ser de tipo orgánico e inorgánicos.

Los principales compuestos orgánicos que se encuentran en el agua, son los carbohidratos, proteínas y lípidos, los cuales entran en descomposición biológica agotando el oxígeno disuelto.

Los compuestos inorgánicos provienen de todas las fuentes de contaminación, se presentan en forma de solución, coloidales y material suspendido, estas

sustancias no presentan un mayor problema, a menos que se encuentren en concentraciones muy altas aumentando la salinidad del agua.

Sustancias inorgánicas como sales de fósforo, nitrógeno y azufre, tienen una importancia relevante por ser los principales nutrientes requeridos para el desarrollo de la vida acuática, sin embargo en cantidades excesivas provocan un desequilibrio ecológico en el cuerpo de agua.

La mayor parte de las sustancias inorgánicas (cloruros, sulfatos silicatos, óxidos metálicos, etc.) son relativamente estables y no están sujetos a procesos de biodegradación, por lo que el grado de autopurificación que presentan los cuerpos de agua con respecto a estos contaminantes estará en función de sus poder de dilución y de la sedimentabilidad de dichos compuestos.

Sustancias tóxicas (sales mercuriales, sustancias químicas, plaguicidas, compuestos radioactivos, etc.) que no se degradan en el cuerpo de agua o lo hacen muy lentamente pueden exhibir dos tipos de toxicidad: efectos inmediatos o efectos a largo plazo.

Estos contaminantes no solo se acumulan, sino que además resultan a menudo “magnificados biológicamente” a medida que circulan por los ciclos biogeoquímicos y a lo largo de las cadenas alimenticias en el cuerpo de agua.(E.P. Odum; 1972)

2.2.3 Alteraciones Biológicas

Las alteraciones biológicas son por una parte, el aumento en la presencia de microorganismos patógenos (principalmente bacterias y virus) capaces de producir enfermedades y por otra, la ausencia de animales y plantas debido a la carencia de oxígeno disuelto en el medio acuático.

Aguas provenientes de la agricultura y de pequeñas comunidades rurales generalmente son enviadas a los cuerpos receptores ocasionando con ello una contaminación localizada o en su caso un incremento en la contaminación. Reconociendo que la contribución per cápita bacteriana es del orden de los 200 millones por día podemos entender el significado de este tipo de contaminación. (Clarence J. Velz ;1970)

La contaminación microbiana de los cuerpos receptores cobra una gran importancia por sus repercusiones sobre la salud humana ya que muchos microorganismos causantes de enfermedades son ampliamente distribuidos en las aguas, este tipo de contaminación proviene en su mayoría de excretas humanas y animales.

Muchas especies de patógenos son capaces de sobrevivir en agua y mantener sus capacidades infecciosas por largos periodos de tiempo; estos patógenos incluyen diversas especies de bacterias, virus, protozoos y helmintos.

2.2.4 La Demanda Bioquímica de Oxígeno y el factor tiempo.

Se conoce como demanda bioquímica de oxígeno (DBO) a la representación de oxígeno disuelto molecularmente que necesitan los microorganismos aerobios para la estabilización de la materia orgánica, en condiciones específicas de temperatura, tiempo y dilución,

Procesos de Descomposición: Aerobio y Anaerobio.

En la naturaleza existen dos, ciclos muy importantes involucrados con la descomposición de la materia orgánica:

- a).- El ciclo de descomposición aerobia, en el que los microorganismos utilizan oxígeno para descomponer a la materia orgánica
- b).- El ciclo de descomposición anaerobia, en el que no se utiliza oxígeno .

Tanto el nitrógeno como el azufre son dos elementos importantes en la síntesis y descomposición de la materia orgánica, pero no son los únicos; existen otros elementos involucrados que pueden ser incluidos en los diagramas de flujo.

Etapas de la DBO.

La DBO se lleva a efecto en dos etapas .

a) Primera etapa:

En esta etapa la mayoría de la materia carbonácea es oxidada (se desdobla) y es convertida en CO_2 , simultáneamente se lleva a efecto la oxidación de materias nitrogenadas a amoníaco.

La etapa comienza inmediatamente y finaliza alrededor de los primeros veinte días de incubación de una muestra de agua a 20°C y se caracteriza por una continua caída de la DBO para cada espacio de tiempo. Si se considera una incubación de la muestra a 20°C durante cinco días y un coeficiente de velocidad de reacción de 0.1 se tiene que la DBO obtenida corresponde al 68% de la última demanda de DBO requerida para la completa estabilización de la materia orgánica.

b).- Segunda etapa.-

Esta etapa incluye la oxidación de la materia nitrogenada la cual es transformada en nitritos y nitratos, comienza inmediatamente después de la primera etapa y su duración es bastante larga.

Se considera que a los 100 días o más es posible lograr la estabilización completa de las aguas residuales.

Estabilidad Relativa.

Como la satisfacción de la DBO se produce ajustándose a períodos de tiempo bien definidos, la realización de exámenes que determinan cuando se agota el oxígeno contenido en una agua contaminada o en el efluente de una planta de tratamiento, darán a conocer también la cifra en la que se ha satisfecho la DBO correspondiente a la primera fase.

Se ha establecido una prueba de laboratorio que consiste en adicionar una pequeña cantidad de azul de metileno anilina a una muestra de agua. Cuando se ha agotado el oxígeno el líquido se encontrará en las condiciones anaerobias y el color del tinte disminuirá debido a los compuestos sulfurosos.

El tiempo necesario para decolorar la muestra indica la proporción en que se ha satisfecho la demanda de la primera fase o, considerando que en estas condiciones se ha llegado a la estabilidad, indicará la estabilidad relativa. Por medio de la ecuación siguiente se puede calcular la estabilidad relativa si se conoce el tiempo necesario para la decoloración:

$$S = \left(\frac{S_t}{La_t} \right) 100 = 100(1 - 10^{-k_t})$$

que puede expresarse como :

$$S = 100(1 - 0.794^{t(20)}) \quad \text{ó} \quad S = 100(1 - 0.605^{t(37)})$$

Donde :

S = estabilidad relativa en porcentaje ;

t_{20} ó t_{37} = tiempo en días necesario para la decoloración cuando las muestras se mantienen a 20 y 37 °C respectivamente.

Los efluentes de las plantas de tratamiento que no se decoloran en 4 días se consideran prácticamente estables y no deben ser perjudiciales si se vierte en una corriente.

El examen de la estabilidad relativa es tosco y por ello no debe sustituir a la determinación de la DBO; no tiene valor para el ensayo de aguas residuales crudas o que sólo hayan pasado por una sedimentación.

El factor Tiempo.

El tiempo medio de exposición del agua a las fuerzas de autodepuración es, en términos matemáticos :

$$\frac{C}{Q} \text{ ó } \frac{L}{v}$$

Donde :

C = Capacidad volumétrica de la unidad de tratamiento.

Q = Velocidad del flujo.

L = Longitud o profundidad de la unidad de tratamiento.

v = Velocidad a través del área de la sección transversal de la unidad.

Como se ha visto la depuración de una corriente depende del tiempo, dicha dependencia se expresa como una constante **K** de velocidad específica de reacción con unidades de tiempo a la -1.

2.3 Zonas de una corriente que recibe aguas residuales

(Lora Soria F. y Miro Chavarria; 1978)

2.3.1 Zona Polisaprobia.

Esta zona comienza con el punto de vertido de aguas usadas y se prolonga aguas abajo. La concentración de oxígeno disminuye progresivamente e incluso puede desaparecer por completo. Las aguas tienen un aspecto sucio y, a lo largo del río, se transforman en no aptas para el desarrollo de la vida superior, cuyas formas se sustituyen paulatinamente por otras inferiores.

A partir de este punto en el que la concentración de oxígeno desciende por debajo del 45 % del punto de saturación, los peces mueren por asfixia. Los metazoos son escasos, pero se encuentran algunos rotíferos y larvas de diversos insectos.

El número de bacterias es muy elevado (1-10 millones/ml) desarrollándose algunas típicas de las aguas residuales (*Sphaerotillus natans*, *leptomitus* y *achlya*). Estos organismos, llamados impropriamente hongos de aguas negras, forman grandes masas filamentosas, que a veces, se adhieren a los materiales del fondo o paredes del cauce o a cualquier objeto, especialmente a los tallos y piedras de las orillas. También se encuentran verdaderos hongos que sustituyen a las plantas verdes y que se alimentan con materia orgánica.

En esta zona las aguas contienen sustancias orgánicas muy diversas, que provienen de la degradación parcial de la materia orgánica. Si las aguas residuales añadidas al río son de origen municipal, contienen, entre otras materias: proteínas y productos de descomposición de éstas. También se encuentran CO y SH₂, procedentes de la descomposición biológica de las proteínas y de la reducción de SO₄.

Una característica de esta zona es el depósito de lodos negruzcos que señalan la presencia de sulfuro de hierro. El depósito de lodos contaminados en una corriente de agua es uno de los factores que hay que tener en cuenta en el estudio de la contaminación. Aunque en el caso de vertidos intermitentes, la contaminación de las aguas puede ser un fenómeno transitorio.

Tomando las demandas biológica y química de oxígeno DBO₅ y DQO como parámetros globales del contenido de materia orgánica, esta zona se caracteriza por unos valores que oscilan entre 15 y 60 mg/l de oxígeno para la DBO₅ y 150 mg/l de oxígeno para la DQO.

2.3.2 Zona α -mesosaprobia.

En esta zona se inicia la recuperación del río. Las características que presentan sus aguas son muy semejantes a las de las aguas residuales diluidas; aunque se siguen produciendo fenómenos de oxidación de la materia orgánica, el contenido de oxígeno disuelto ya es suficiente para la vida de los organismos superiores.

El número de bacterias (0.1 - 1 millón/ml) disminuye, mientras que el de protozoos, rotíferos y crustáceos aumenta progresivamente. También viven diversas especies de peces que toleran los cambios bruscos en la concentración de oxígeno (ciprinidos).

Los habitantes típicos son *Oscillatoria*, *Euglena* y *Navicula*. También abundan los hongos *Fusarium* y larvas de insectos.

El contenido de oxígeno de esta zona es mayor que en la polisaprobia aunque experimenta grandes variaciones a lo largo del día, pues en parte, se origina en la función clorofílica de diversos organismos verdes que en ella habitan. Por tanto, durante la noche, al faltar la función clorofílica, se produce un déficit de oxígeno disuelto pues la cantidad de éste que se requiere para oxidar la materia orgánica, es todavía muy elevada.

Una diferencia notable entre los lodos depositados en las zonas polisaprobias y mesosaprobias es que en estas últimas no son negruzcos, ya que la

descomposición de la materia orgánica se realiza preferentemente por vía aerobia y no se producen grandes cantidades de H_2S .

El lodo suele tener un color verde, debido a la presencia de algas cianofíceas. Sobre estos sedimentos se desarrollan poblaciones de diversos gusanos (anélidos, poliquetos, tubifex), moluscos y larvas de insectos.

Los valores de demanda biológica y química de oxígeno son, respectivamente, DBO_5 5 - 10 mg/l y DQO 20 - 50 mg/l de oxígeno.

2.3.3 Zona β -mesosaprobia.

Al llegar a esta zona la recuperación del río ya está muy adelantada y es en ella en la que se completa el proceso de autodepuración.

Las aguas son ricas en oxígeno y con frecuencia pueden llegar a la saturación; el número de bacterias disminuye hasta menos de 100,000/ml.

Por último, se registra la presencia de un gran número de especies de microflora y microfauna, así como de peces.

2.3.4 Zona oligosaprobia.

En esta zona las aguas del río ya han alcanzado el aspecto y características que presentan en el estado natural; la vida vegetal y animal se desarrolla

normalmente, con la única limitación impuesta por el clima y las condiciones de la región por donde aquel escurre.

En la zona oligosaprobia tienen lugar los procesos de mineralización de la materia orgánica que está presente en el agua de modo natural y que proviene principalmente de las actividades metabólicas de la fauna y flora así como de la descomposición de las especies muertas.

El número de bacterias es inferior a 10,000/ml y la fauna y la flora son muy variadas y abundantes y existe una gran cantidad de larvas de insectos que sirven de alimento a los peces.

Al igual que en la zona mesosaprobia, las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua son muy elevadas.

Los fenómenos de descomposición bioquímica se realizan por vía aerobia, los lodos en estado de putrefacción han desaparecido por completo y no se registra ningún desprendimiento de burbujas gaseosas.

La DBO_5 oscila entre 2 y 4 mg/l y la DQO entre 10 y 20 mg/l.

3. Marco Legal

La clasificación de cuerpos receptores a nivel cuenca persigue la mejor planeación y administración del recurso hidráulico, a través de la determinación de los usos actuales y potenciales del agua, de las características de calidad que deben conservarse para mantener dichos usos y de la capacidad autopurificadora de los cuerpos receptores de descargas de aguas residuales, así mismo, la realización de estos estudios garantiza el uso óptimo del agua y recomienda los dispositivos de tratamiento. (Flores, 1986)

Es derecho y obligación de la Federación aprovechar adecuadamente los recursos naturales y disponer los instrumentos legales que permitan enfrentar los problemas de contaminación.

3.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Constitución política es la base de la legislación ambiental, marcando en su artículo 27 la propiedad de las tierras y aguas comprendidas en el territorio nacional.

3.2 Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La LGEEPA en el Título tercero “Aprovechamiento sustentable de los elementos naturales”, capítulo III que se refiere a la prevención y control de la contaminación del agua de los ecosistemas acuáticos, menciona que:

Artículo 117. Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios:

- I. La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;
- II. Corresponde al Estado y a la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo.

Artículo 118. Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en:

- VII. La clasificación de cuerpos receptores de descarga de aguas residuales, de acuerdo a su capacidad de asimilación y dilución y la carga contaminante que estos puedan recibir.

3.3 Ley de Aguas Nacionales

En su Título Séptimo para la prevención y control de la contaminación de las aguas, artículo 86 menciona que: la CNA tendrá a su cargo formular

programas integrales de protección de los recursos hidráulicos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua.

Artículo 87. La CNA 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 pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, las cuales se publicarán en el Diario Oficial de la Federación, lo mismo que sus modificaciones, para su observancia.

Las declaratorias contendrán:

- I. Delimitación del cuerpo de agua clasificado;
- II. Los parámetros que deberán cumplir las descargas según el cuerpo de agua clasificado conforme a los períodos previstos en el reglamento de esta ley;
- III. La capacidad del cuerpo de agua para diluir y asimilar contaminantes; y
- IV. Los límites máximos de descarga de los contaminantes analizados, base para fijar las condiciones particulares de descarga

La Ley de Aguas Nacionales se apoya en el reglamento para la prevención y control de la contaminación de las aguas.

3.4 Criterios de la calidad de los cuerpos de agua.

En la república mexicana, como en la gran mayoría de los países se han establecido las normas y criterios que rigen a la calidad del agua para los diferentes usos; con fecha 13 de Diciembre de 1989, se publicó en el Diario Oficial de la Federación, el último documento al respecto.

Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89 (Anexo 1 Tablas, Definiciones, Criterios Ecológicos de calidad del agua)

3.5 Gobierno del Estado

Es importante mencionar que de acuerdo en lo descrito en el plan de Trabajo estatal descrito en el periódico oficial del Gobierno del Estado de Tlaxcala 1993-1999 uno de los objetivos esenciales es revertir el proceso de deterioro ecológico y preservar los recursos naturales.

De tal manera que dentro de las políticas y lineamientos de acción en este rubro las más significativas son:

- Estimular la investigación científica y el desarrollo tecnológico de orientación agropecuaria, forestal y ecológica, acorde a las circunstancias de la entidad.

- Impulsar proyectos abocados a la preservación ecológica, concientizando y capacitando acerca de técnicas disponibles para el ahorro y uso eficiente del agua.

- Fomentar la ejecución de programas anuales de conservación de las principales corrientes y drenes

- Promover el manejo integral de cuencas, que generen alternativas para evitar el deterioro de las mismas.

4. Modelos matemáticos

La elección de estrategias y acciones correctivas para saneamiento de una corriente superficial afectada por el vertimiento de contaminantes en su cauce o la implantación de medidas preventivas para conservar la calidad de un cuerpo de agua, debiera estar sustentada en la simulación del comportamiento de la calidad con respecto a la distancia y al tiempo, con el objeto de garantizar que sean realistas y eficaces a la vez.

La forma más sencilla y accesible para realizar una simulación de calidad del agua, es emplear modelos matemáticos correlacionando los parámetros de interés sanitario o ambiental de los que existen datos provenientes de mediciones y cuyos mecanismos de evolución en el medio acuático sean conocidos.

Al emplear un modelo matemático deberá tomarse en cuenta que sólo va a proporcionar una representación aproximada de las condiciones reales, y que, mientras mayor precisión sea requerida, será mayor el número de variables que deban agregarse al modelo, con las consiguientes complicaciones debidas al cúmulo de información requerida y por incrementarse significativamente las necesidades de tiempo para los cálculos a efectuar, de ahí que al escoger un modelo será suficiente con que se consideren las principales entradas y salidas de materia y energía del sistema.

Actualmente se han desarrollado diferentes modelos para simular la calidad del agua en corrientes superficiales, centrados principalmente en el

comportamiento del oxígeno disuelto, ante la presencia de materia orgánica provenientes de distintos tipos de descargas de aguas residuales, en virtud de que el contenido de oxígeno disuelto es fundamental para el sostenimiento de la vida acuática aerobia, así como para cualesquiera de los usos a que el agua se destinen.

Para efectuar el balance de oxígeno, algunos modelos consideran solamente las principales entradas y salidas, como la reaeración a través de la superficie del cuerpo de agua, la solubilidad en función de la temperatura y la remoción debida a la actividad microbiana sobre la materia orgánica carbonosa. En cambio modelos más detallados incluyen además la producción de oxígeno por la actividad fotosintética de las algas, la solubilidad en función de la presión barométrica y la remoción por oxidación del nitrógeno amoniacal en el proceso de nitrificación, por la demanda bioquímica de oxígeno de los sedimentos y por la respiración de las algas.

Algunos modelos han sido diseñados para simular otros parámetros distintos al oxígeno disuelto, que pueden o no estar relacionados con él; por ejemplo: la demanda bioquímica de oxígeno, la temperatura, nitrógeno orgánico amoniacal, nitritos, nitratos, fósforo orgánico y soluble, algas (como clorofila), coliformes fecales y constituyentes conservativos.

Obviamente que mientras más parámetros puedan ser simulados por un modelo, mayor es su utilidad en programas de administración de la calidad del agua, pero su calibración y validación deben estar soportadas por una base de datos adecuada y confiable.

4.1 Fórmula de Streeter-Phelps

(Nemerow N. L., 1975).

4.1.1 Determinación de las constantes que componen el modelo

Constante de Desoxigenación (K_D)

Esta constante indica la velocidad con que se consume el oxígeno disuelto en un tramo de estudio como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica carbonosa y nitrogenada que contiene, y se calcula con el objeto de conocer la cantidad de oxígeno que pierde el cuerpo receptor.

La utilización de oxígeno disuelto en el río sigue una reacción de primer orden como en el caso de la utilización de oxígeno disuelto en un frasco de DBO por bio-oxidación, en un tramo determinado del río con características químicas y biológicas semejantes, se puede determinar en el laboratorio al hacer las siguientes consideraciones:

La desoxigenación es constante a lo largo del tramo de la corriente

La reacción en la corriente y en los frascos es de primer orden. La DBO_u es la medición de la materia orgánica total presente en el tramo de la corriente

Se conservan condiciones fijas a lo largo del tramo considerado

$$K_D = \frac{1}{T_R} * \ln \frac{L_0}{L}$$

Donde:

K_D = DBOu al inicio (mg/l)

L = DBO en el tiempo t

T_R = Tiempo de recorrido en días

Constante de remoción de DBO (K_R)

Cuando la remoción de DBO es producida por otros mecanismos aparte de la bio-oxidación como son sedimentación y absorción, se debe incluir en el modelo la constante K_R .

$$K_R = K_D + K_3$$

Donde:

K_3 = Tasa de remoción debida a la sedimentación y/o absorción

Cuando los fenómenos mencionados no existen $K_R = K_D$.

Constante de reaereación (K_2)

La reaereación del agua de un río es un proceso natural de transferencia de masa. La tasa de transferencia de masa de oxígeno en un río depende de las características del agua, temperatura, del gradiente de oxígeno y del gradiente de presiones parciales, así como del aire del segmento donde la transferencia es el tipo de difusión molecular.

La forma general deducida en base a la primera ley de Fick es:

$$K_2 = aU^m H^{-n}$$

En donde:

U y H = Velocidad y profundidad media respectivamente

K_2 = Coeficiente de reaereación

a, m y n = Parámetros característicos de cada río en particular

Formula propuesta por O'Connor para una temperatura de 20 °C

$$K_2 = \frac{4.0 * U^{1/2}}{H^{3/2}}$$

Donde:

U = Velocidad media en m/s

H = Profundidad media en m

Corrección por temperatura

La temperatura es uno de los más importantes factores en cualquier sistema biológico. Los cambios de temperatura producen aumento o reducción de la velocidad de reacción así como en la transferencia de oxígeno.

Cuando se requiere conocer las tasas de reacción y reoxigenación a diferentes temperaturas se emplea la expresión propuesta por Van't Hoff-Arrhenius.

$$K_t = K_{20}(\theta)^{T-20}$$

Donde:

T = Temperatura en la corriente en ° C

θ = Coeficientes de temperatura

Corrección por volumen de escurrimiento

Los diferentes volúmenes de escurrimiento afectan a la autopurificación mediante la relación con la tasa de reacción (K_2). Investigaciones llevadas a cabo en relación a lo anterior han dado por resultado la ecuación siguiente.

$$K_2 = a * Q^b$$

En donde la tasa de reaeración varia directamente proporcional a una constante “a” y en forma potencial a una constante “b” para cada río en especial.

Para obtener las constantes mencionadas se debe contar con un mínimo de tres valores de K_2 , para tres diferentes Q , en esta forma se puede establecer la ecuación.

$$\log K_2 = \log a + \log b * Q$$

Los tres valores diferentes se grafican en papel logarítmico y se determinan los valores a y b.

4.1.2 Parámetros que intervienen en el modelo

Oxígeno Disuelto

El valor de oxígeno disuelto que se emplee en el modelo será el determinado estadísticamente por el percentil 25 en base a los datos obtenidos en campo.

Demanda bioquímica de oxígeno

La demanda bioquímica de oxígeno utilizada es la llamada de termino largo o DBO_u. Se debe obtener la relación de DBO_u a DBO₅ cuando se determine la K_D . Este valor se empleará después con el valor de DBO₅ seleccionado que

será para cada punto a analizar, el percentil 75 de los valores de campo medidos.

Volumen de escurrimiento

Para la calibración del modelo se utilizará el gasto de los siete días consecutivos más secos durante la etapa de muestreo y mediciones de campo. Lo anterior sirve para ajustar las constantes tanto de desoxigenación, remoción de DBO o reoxigenación.

Efecto de la carga bental.

Cuando el agua residual lleva muchos sólidos en suspensión capaces de sedimentarse, se efectúa una remoción más rápida de la DBO por este fenómeno y se obtiene la tasa K_R en ese tramo, sin embargo los sólidos sedimentables ejercen una DBO en el agua que escurre encima de ellos.

Esta carga debe ser considerada y agregada al modelo cuando este fenómeno sucede. El término que se agrega es:

$$Ds_B = \frac{s_B}{HK_2} * (1 - e^{K_2 t'})$$

Donde:

Ds_B = Déficit originado por la carga bental

K_2 = Tasa de reoxigenación

s_B = Demanda de lodos bentaes

t = Tiempo

H = Profundidad media en la corriente

Cuando el fenómeno antes descrito tiene lugar en una corriente la ecuación general se convierte en:

$$D = D_0 e^{-K_2 t} + \frac{K_D L_0}{K_2 - K_R} [e^{-K_R t} e^{-K_2 t}] + \frac{S_B}{K_2 H} [1 - e^{-K_2 t}]$$

4.1.3 Otros parámetros

Demanda bioquímica de la materia nitrogenada

Cuando este fenómeno se presenta, el déficit de oxígeno ocasionado se calcula con la siguiente expresión:

$$D_N = 4.57^{K_n N_0} (e^{-K_n t} - e^{-K_2 t})$$

Donde:

K_n = Tasa de desoxigenación de la materia orgánica nitrogenada

N_0 = Concentración de la materia orgánica nitrogenada inicial

t = Tiempo

K_2 = Tasa de reoxigenación

Fotosíntesis y respiración

La solución general de estos dos fenómenos es:

$$D_F = \frac{R - P_a}{K_2} [1 - e^{-K_2 t}]$$

$$P_a = \frac{tp}{24} * \frac{2}{P} * P_{max}$$

En donde:

D_F = Déficit de oxígeno por efecto de la fotosíntesis y respiración

R = Consumo de oxígeno por la respiración del plancton

P_{max} = Producción máxima de oxígeno por efecto de la fotosíntesis

K_2 = Tasa de reoxigenación

tp = Tiempo de producción

t = Tiempo de paso

Carga remanente

Consiste en verificar que la carga orgánica al inicio de un tramo cualquiera sea sensiblemente igual a la carga removida por la corriente en este tramo más la no removida, en función del coeficiente de remoción y del tiempo de recorrido.

Esta se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$L = L_0 - L_0 e^{-K_R t}$$

Donde:

L = Carga orgánica como DBOu después de un tiempo t

L_0 = Carga orgánica como DBOu al inicio del tramo

K_R = Coeficiente de remoción

t = Tiempo de recorrido en el tramo en días

Balance de materia

El balance de materia o carga orgánica consiste en verificar que la carga orgánica al inicio de un tramo cualquiera sea sensiblemente igual a la carga inicial del tramo anterior menos la carga removida por la corriente en función al coeficiente de remoción y del tiempo de recorrido.

El balance de materia permite calibrar las constantes y verificar los resultados reportados por el laboratorio de DBO₅.

Déficit de Oxígeno

Al oxígeno disuelto necesario para que la corriente se equilibre se le llama “déficit de oxígeno” y se calcula con la siguiente fórmula:

$$D = D_0 e^{-K_2 t} + \frac{K_D L_0}{K_2 K_R} (e^{-K_R t} - e^{-K_2 t})$$

Donde:

D = Déficit de OD en el tiempo t

D_0 = Déficit de OD inicial

L_0 = DBO última al inicio

K_2 = Tasa de reoxigenación

K_D = Tasa de desoxigenación

T_R = Tasa de remoción de DBO

t = Tiempo en días

L = DBO en el tiempo t

Tiempo crítico

Es el tiempo necesario para la completa recuperación del río

$$T_c = \frac{1}{K_{Dc}(f-1)} \ln \left(f \left(1 - (f-1) \left(\frac{D_0}{L_0} \right) \right) \right)$$

Donde:

T_c = Tiempo crítico de recorrido en días

K_D = Tasa de desoxigenación

f = Factor de autopurificación

D_0 = Déficit inicial de oxígeno

L_0 = Carga orgánica en el tramo

El factor de autopurificación f es una constante de la autopurificación que se puede obtener en tablas (Ver tabla 25 Factor F) o bien calcularse

$$F = \frac{K_2}{K_D}$$

Donde :

F = Factor de autopurificación

K_2 = Constante de reaeración

K_D = Constante de desoxigenación

Carga Asimilable

Se refiere a la cantidad de materia orgánica que puede asimilar el río

$$L_c = \frac{D_c * f}{e^{(-k_D * T_R)}} (86.4)(Q)$$

Donde:

D_c = Déficit crítico de oxígeno

Q = Gasto

T_R = Tiempo crítico

f = Factor de autopurificación

$K_{Dc} = K_D$ corregida

Porcentaje de remoción en el cuerpo receptor

La cantidad de materia orgánica que puede removerse en un tramo de la corriente con respecto a la carga orgánica real y a la carga asimilable, se conoce como porcentaje de remoción

$$\%R_e = \left[\frac{(L_r - L_c)}{L_r} \right] 100$$

Donde:

L_r = Carga orgánica real que recibe el cuerpo receptor

L_c = Carga orgánica asimilable

4.2 Método de Thomas para determinar la Capacidad de Asimilación de las Corrientes.

Thomas ha desarrollado una útil simplificación de las ecuaciones de Streeter-Phelps para calcular las posibilidades de asimilación de una corriente. En este método, las constantes de la corriente K_1 y K_2 se calculan como en el punto anterior. Sin embargo, propone la utilización de un nomograma para determinar el déficit de oxígeno en cualquier momento aguas abajo de un vertido contaminante.

Inversamente se puede calcular la carga contaminante que produce un déficit crítico en la concentración de oxígeno disuelto, aplicando el mismo gráfico.

Thomas considera que la ecuación de Streeter-Phelps es difícil de aplicar y en gran parte de las aplicaciones solo se puede resolver después de varias pruebas; Considera que esta desventaja se puede evitar con la utilización de este gráfico.

Antes de utilizarlo hay que determinar K_1 , K_2 , DA y LA . Trazando una línea recta que una el valor apropiado de DA/LA en las ordenadas con el punto que represente el tiempo adecuado por la constante (K_{2t}), en la curva K_2/K_1 que corresponda, se obtiene entonces el valor D/LA en la intersección con las ordenadas.

Finalmente el valor apropiado del déficit al final del día se obtiene multiplicando LA por el valor en la intersección.

4.3 Método de Churchill de la Correlación Lineal Múltiple.

Del estudio de 24 muestras de un río tomadas en puntos apropiados Churchill y Buckingham encontraron que existía una adecuada correlación entre la DBO, OD, temperatura y caudal. En otras palabras, que la curva del oxígeno disuelto en la corriente depende sólo de tres variables DBO, temperatura y caudal.

Por el método de los mínimos cuadrados se puede obtener la línea de correlación, de forma que se puede predecir la curva del oxígeno, para cualquier carga. Este método elimina el problema de la determinación molesta y difícil de averiguar el tiempo de paso entre los puntos de muestras y las constantes resultantes (K_1 , K_2 y K_3).

Nelson N. Nemerow ha encontrado que el método de Churchill y Buckingham da una buena correlación, si cada muestra del río se recoge y analiza en condiciones máximas o mínimas de una de las tres variables. Solamente se necesitan seis muestras en un estudio para obtener unos resultados confiables, muestras adicionales, pueden producir una cierta exactitud complementaria, pero seguramente la mejora obtenida no compensa los esfuerzos realizados.

5 METODOLOGIA

El éxito de cualquier estudio de contaminación de corrientes se basa principalmente en la metodología utilizada dentro del proyecto, ya que esta debe ser clara y sencilla para poder obtener como resultado final la validez de los datos que se requieran y que servirán de base para evaluar la calidad del agua de la corriente en estudio.

5.1 Actividades de Gabinete

Se determina el área de trabajo con la ayuda de la cartografía disponible y actualizada proporcionado por INEGI, Gobierno del Estado y CNA, realizándose una revisión bibliográfica de los trabajos e investigaciones existentes de los temas relacionados con la recuperación de corrientes.

Se recopila la información existente sobre la cuenca en estudio, así como se visitan diferentes dependencias de gobierno (CGE, ECCAET, CNA) para obtener información específica sobre la corriente, los sistemas de tratamiento de agua existentes, el entorno general, localización, aspectos hidrológicos, climatológicos, y socioeconómicos entre otros.

Se establecen los tramos, estaciones y frecuencia de muestreo, de acuerdo al programa existente en la CNA (Calendario de muestreo en el río Zahuapan) para la clasificación del río Zahuapan y el programa de monitoreo continuo.

Se modifica el modelo matemático SICLACOR desarrollado por la CNA para realizar los estudios de clasificación de ciertos ríos, en una hoja de cálculo (Excel 6.0 de Microsoft) que es una compilación bibliográfica de Metcalf-Eddy (1994), Ramalho (1991), Fair Feyer, Okun (1996), Rivas (1978), Nemerow (1977) y CNA (1992), dado que el manual del modelo SICLACOR no contempla todos los parámetros incluidos en la modificación.

Se aplica el modelo matemático modificado del SICLACOR con los datos obtenidos en campo y laboratorio determinando la capacidad de asimilación y dilución de la corriente por tramos.

Se realizan las simulaciones a corto mediano y largo plazo para conocer las condiciones de descarga más representativas de la corriente con el fin de obtener una calidad de agua específica para los diversos tramos de la corriente de acuerdo a la calidad del agua que se pretende alcanzar.

Con los datos obtenidos en la modelación y simulación se evalúa la capacidad de asimilación, dilución, porcentaje de remoción y carga contaminante que puede recibir la corriente mediante las características de calidad del agua.

Se realiza un programa de visitas a las plantas de tratamiento más representativa tanto industriales como municipales, valorándose en base a los listados de la CNA, de acuerdo al volumen descargado al cuerpo receptor y a los valores descargados de los parámetros usados en el modelo. (Ver Tabla anexo 3. Plantas de tratamiento visitadas)

Se determinan los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales, de acuerdo con las metas de calidad del agua, estimando los cambios de la situación actual debido al desarrollo previsto a corto y mediano plazo obteniendo el comportamiento de la corriente con dichos cambios.

Se evalúa la factibilidad técnica de cambio en las plantas de tratamiento actuales para la recuperación de la corriente y se definen acciones a realizar para mejorar la calidad del agua, de acuerdo a las metas establecidas para regular las descargas de aguas residuales.

5.2 Actividades de Campo

Después de conocer el área en base a la investigación bibliográfica y cartográfica se realiza un recorrido de la corriente para actualizar la información obtenida, validando las estaciones propuestas por la CNA en trabajos anteriores y dividiendo la corriente, de acuerdo a las variaciones en volúmenes, descargas, tomas, derivaciones y confluencias con otras corrientes, determinando también los parámetros a evaluar de forma directa sobre el río.

Los puntos de muestreo y aforo se establecen antes y después de las descargas, afluentes y aprovechamientos detectados, durante los meses de estiaje, recolectando tres muestra simples en cada punto establecido. La toma de muestras se realiza conforme a lo establecido en la normatividad vigente

(NMX-AA-003. Aguas residuales. Muestreo y NOM 001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales).

Se visitan los sistemas de tratamiento y/o descargas más representativas sobre la corriente considerando el gasto y la contaminación de la descarga como puntos específicos. Se realiza un recorrido por las instalaciones de la planta, con el objeto de conocer el tren de tratamiento de la misma; se entrevista al operador, además de verificar los registros internos de funcionamiento sobre los siguientes puntos: Variación del flujo, calidad del agua tratada, eficiencia de la planta, problemas de operación y puntos de descarga.

5.3 Actividades de Laboratorio

Los análisis y/o determinaciones requeridos en el estudio de la corriente se llevan a cabo en el laboratorio de la CNA delegación Tlaxcala, aplicándose las técnicas contenidas en las normas oficiales mexicanas que se presentan a continuación:

NMX-AA-007-1980. Aguas. Determinación de la temperatura. Método visual con termómetro.

NMX-AA-008-1980. Aguas. Determinación de pH. Método potenciométrico.

NMX-AA-028-1981. Determinación de demanda bioquímica de oxígeno. Método de incubación por diluciones.

NMX-AA-030-1981. Análisis de aguas. Demanda química de oxígeno. Método de reflujo de dicromato.

NMX-AA-042-1987. Aguas. Determinación del número más probable de coliformes totales y fecales. Método de tubos múltiples de fermentación.

NMX-AA-077-1982. Aguas. Determinación de oxígeno disuelto.

NMX-AA-004-1977. Determinación de sólidos sedimentables en aguas residuales. Método del cono Imhoff.

NMX-AA-020-1980. Aguas. Determinación de sólidos disueltos totales. Método gravimétrico.

NMX-AA-034-1981. Determinación de sólidos en agua. Método gravimétrico.

6. ZONA DE ESTUDIO

6.1 Descripción de la corriente

El río Zahuapan es la principal corriente del Estado de Tlaxcala, tiene su origen en los escurrimientos que descienden de la vertiente sur del accidente orográfico conocido como sierra de Puebla. Escurre inicialmente al suroeste de la población de Atlangatepec, internándose al centro del estado de Tlaxcala con un curso irregular hasta que confluye con el río Atoyac.

Desde su nacimiento hasta confluir con el río Atoyac en el Estado de Puebla, el río Zahuapan recorre 82.75 km pasando a través de 42 municipios de los 60 existentes en el estado de Tlaxcala.

6.1.1 Aspectos Geográficos

Localización Geográfica

El estado de Tlaxcala se localiza en la parte centro oriente del país, entre las coordenadas geográficas extremas: al norte $19^{\circ} 06'$ de latitud norte, al este $97^{\circ} 37'$ y al oeste $98^{\circ} 44'$ de longitud oeste. (Figura 1)

Se encuentra situado en las tierras altas del eje neovolcánico sobre la meseta de Anáhuac, a una altura por arriba de los 2,000 ms.n.m. y colindando al norte con

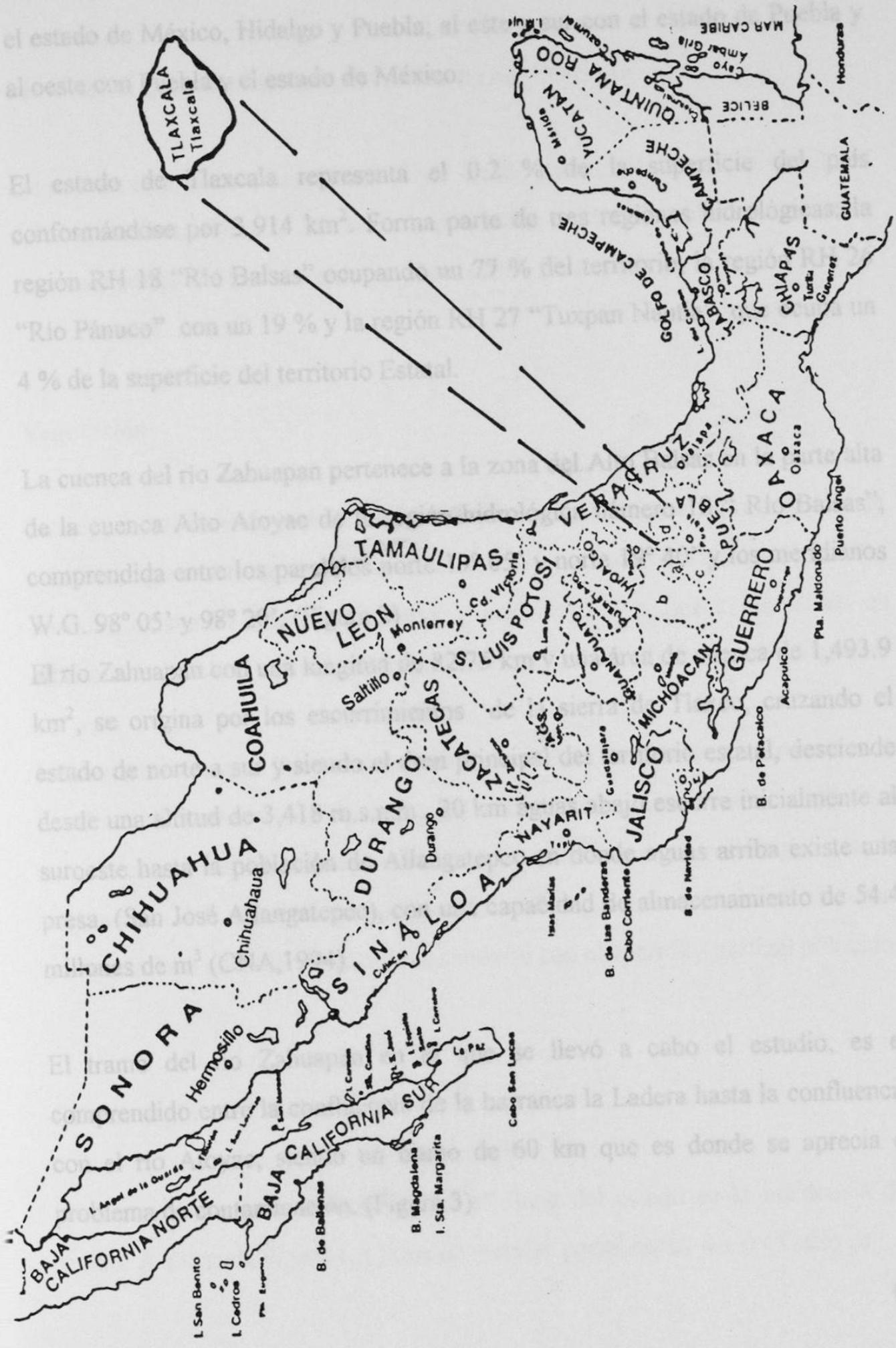


Fig 1. Localización del Estado de Tlaxcala en la República Mexicana

el estado de México, Hidalgo y Puebla; al este y sur con el estado de Puebla y al oeste con Puebla y el estado de México.

El estado de Tlaxcala representa el 0.2 % de la superficie del país conformándose por 3,914 km². Forma parte de tres regiones hidrológicas; la región RH 18 “Río Balsas” ocupando un 77 % del territorio; la región RH 26 “Río Pánuco” con un 19 % y la región RH 27 “Tuxpan Nautla” que ocupa un 4 % de la superficie del territorio Estatal.

La cuenca del río Zahuapan pertenece a la zona del Alto Balsas en la parte alta de la cuenca Alto Atoyac de la región hidrológica número 18 “Río Balsas”, comprendida entre los paralelos norte 19° 05' y norte 19° 40' y los meridianos W.G. 98° 05' y 98° 20'. (Figura 2)

El río Zahuapan con una longitud de 82.75 km y una área de cuenca de 1,493.9 km², se origina por los escurrimientos de la sierra de Tlaxco, cruzando el estado de norte a sur y siendo el dren principal del territorio estatal, desciende desde una altitud de 3,418 m.s.n.m., 20 km aguas abajo escurre inicialmente al suroeste hasta la población de Atlangatepec en donde aguas arriba existe una presa (San José Atlangatepec), con una capacidad de almacenamiento de 54.4 millones de m³ (CNA,1994).

El tramo del río Zahuapan en el que se llevó a cabo el estudio, es el comprendido entre la confluencia de la barranca la Ladera hasta la confluencia con el río Atoyac, siendo un tramo de 60 km que es donde se aprecia el problema de contaminación. (Figura 3)

Municipios que atraviezan la corriente en su recorrido

Dentro de esta cuenca se ubican 42 de los 60 municipios con que cuenta el estado, concentrándose el 72 % de la población total en la subcuenca de esta corriente con un 37 % del territorio total estatal. (Ver tabla 4)

Vegetación

La vegetación existente en el estado es predominantemente representativa de climas templados fríos con especies como pino, encino, oyamel y sabino, los bosques existentes son de coníferas y encinos, los cuales se localizan en altitudes de 2,568 m.s.n.m o más abarcando un 13.38 % de la superficie estatal.

Los sistemas de gran llano con lomerios al este, la llanura de piso rocoso con lomerios al oeste y los lomerios al sur de la entidad, están dedicados actualmente a las labores agrícolas, por lo que no son representativos de la vegetación del estado y son los únicos en donde no existe bosque, presentándose además vegetación secundario con chaparral y pastizal inducido.

Climatología

Un factor importante que influye en el clima del estado es la incidencia del viento. A Tlaxcala llegan dos tipos de vientos: por el norte, los del Golfo de



Fig 2. Cuenca del Río Zahuapan

México, que en su camino pierden calor y humedad, son fríos y secos; por el sur llegan vientos provenientes de las costas del Pacífico principalmente sobre el Valle Tlaxcala-Puebla y en la ladera sur de la Malinche son más cálidos, están cargados de humedad y son determinantes en la intensidad de las lluvias.

Como producto de esto y otros factores, el clima de Tlaxcala se clasifica dentro del grupo de climas templados y sólo en las cumbres del volcán la Malinche apreciamos climas fríos y muy fríos.

En general se pueden observar cuatro tipos representativos de climas; el templado subhúmedo con lluvias en verano C (w), que abarca un 93.40 % de la superficie estatal; el semifrío subhúmedo con lluvias en verano C (E) (w), con un 5.37 % de la superficie; el semiseco templado BS1k con solo un 0.99 % de la superficie y el frío E (T) que se localiza en altitudes mayores a los 2,860 m.s.n.m. con solo un 0.24 % de la superficie estatal.

En la mayor parte del año en casi toda la superficie estatal las mañanas son frescas y el medio día templado, la temperatura promedio varia entre los 12°C y los 18°C, las temperaturas máximas se registran en el verano, llegando a alcanzar valores que van de los 28°C a 30°C y en invierno se registra un descenso de hasta -1°C.

La época de lluvias comprende los meses de junio a septiembre mientras que en el resto del año, éstas son muy escasas, además la superficie de la entidad se ve afectada con heladas y cada dos o tres años por severas sequías.

Precipitación.

La precipitación representa la principal forma de recarga en los acuíferos y generadora de escurrimientos, no existiendo otra aportación tanto para aguas subterráneas como superficiales.

Se ha podido estimar (Programa Hidráulico 1995-2000) la precipitación anual promedio en el estado en 713 mm, con ello se ha calculado que el volumen precipitado anual es de 2,789 Mm³.

La precipitación media anual en la entidad, es más abundante en la zona centro poniente y sur del estado, donde varían valores de 628 hasta 1,100 mm, en tanto en la región oriente y sur poniente las precipitaciones son menores a los 700 mm.

6.1.2 Aspectos hidrológicos

Delimitación de la región hidrológica

La región hidrológica 18 “Balsas” cuenta con una superficie total de 45,362 km², representando la cuenca del río del mismo nombre que se encuentra dividida en siete subcuencas, de estas, parte de dos de ellas se encuentran dentro del estado de Tlaxcala; la subcuenca río Atoyac o alto Balsas, donde la

corriente principal es el río Atoyac que junto con su diversos afluentes da origen al río Balsas y la subcuenca Cerrada del Valle Libres-Oriental.

El río Zahuapan, nace en la serranía de Tlaxco casi en los límites entre los estados de Puebla y Tlaxcala, desciende de las faldas del Peñón del Rosario desde una altitud de 3,418 m.s.n.m.; atraviesa los municipios de Atlangatepec, Muñoz de Domingo Arenas, Xaltocan y Apizaco, 6 km al suroeste de esta localidad, recibe por la margen izquierda al río Apizaquito, a partir de esta confluencia empieza a describir una curva cuya dirección es hacia el suroeste del estado, en esta parte bordea los abanicos aluviales formados por las corrientes que descienden del flanco occidental del volcán La Malinche, siguiendo su curso hacia el sur, cruza por la parte norte a la ciudad de Tlaxcala, donde recibe por la margen derecha al río Totolac, río abajo recibe en la margen izquierda al río Viejo, el cual conduce una serie de escurrimientos, entre los que destacan las barrancas Briones y Seca, finalmente el río Zahuapan escurre al sur-sureste para confluir con el río Atoyac en el Estado de Puebla.

Por su extensión y recursos de agua, el sistema Atoyac-Zahuapan, representa hidrológicamente hablando la zona más importante del estado; esta constituido principalmente por dos corrientes, el río Zahuapan que corre de norte a sur y el río Atoyac que escurre de poniente a oriente, uniéndose entre sí a la altura de la población de Xicohtzinco en el estado de Tlaxcala, para continuar hacia el sur hasta entrar al vaso de la presa Valsequillo (Manuel Avila Camacho) en el estado de Puebla.

Tabla 1. Afluentes naturales con mayor gasto en el río Zahuapan

Afluente	Gasto m ³ /s
1. Arroyo San Benito o Atixtaca	0.048
2. Río Ocotoxco-Tlatlahuquitepec	0.03
3. Río Atenco o Tequisquiatl	0.36
4. Río dos arroyos	0.01
5. Arroyo Metlahuapan	0.015
6. Arroyo sin nombre	0.01
7. Río Totolac	0.116
8. Río Viejo	0.11
9. Barranca de Guardia	0.038
10. Barranca Corazón de Jesús	0.019
Total	0.756

Fuente: CNA. 1996

- Existen 18 afluentes más de la corriente con un gasto menor a 0.01 m³/s

Hidrografía y Fisiografía de la cuenca.

La cuenca del sistema Atoyac-Zahuapan tiene forma irregular con una área de drenaje de 3,923 km² localizada en la provincia fisiográfica denominada eje neovolcánico, que se caracteriza como una enorme masa de rocas volcánicas de todos los tipos, acumulada en innumerables y sucesivos episodios volcánicos iniciados a mediados del terciario (unos 35 millones de años atrás) y continuados hasta el presente, esto también indica la presencia de estratovolcanes que componen la cima nevada como el Popocatepetl (5,465 m.s.n.m.), el Iztaccíhuatl (5,230 m.s.n.m.) y la Malinche (4,461 m.s.n.m.) que lo comparten los estados de Puebla y Tlaxcala.

Fisiográficamente, la cuenca se encuentra localizada en la subprovincia de los lagos y volcanes del Anáhuac, en una llanura aluvial con lomeríos bajos, constituidos por roca basáltica.

Hidrometría.

A lo largo de la corriente del río Zahuapan existen 3 puntos de aforo (Atlangatepec, Tlaxcala y Xicohtzinco) mediante los que se observa el comportamiento de las corrientes; delimitando una área tributaria o subcuenca. (Figura 4)

Tabla 2. Subcuencas del Sistema Atoyac-Zahuapan (Estado de Tlaxcala)

No. de Subcuenca	Denominación	Area (Km ²)
I	Atlangatepec	220.30
II	Tlaxcala	812.20
III	Xicohtzinco	461.40
IV	San Jacinto	1,305.00

Escurremientos

La determinación de los escurrimientos en las tres subcuencas que se localizan dentro del área de estudio queda de la siguiente manera, constituyendo principalmente los generados por las precipitaciones en época de lluvias.

Subcuenca I Atlanga.

El promedio anual escurrido por cuenca propia en esta área equivale a los volúmenes de entrada al vaso de la presa del mismo nombre, estos se estiman en 15.97 millones de m³.

Subcuenca II Tlaxcala.

En este punto existe estación de aforos con período de registro continuo y confiable, sin embargo, el gasto medio equivale al proporcionado por cuenca propia, más el volumen desfogado al río por la Presa de Atlanga para ser utilizado en la segunda unidad del distrito en la Derivadora de Panotla.

El volumen escurrido medio anual observado fue del orden de 112 millones de m³, en un período de 1977 a 1992; con un volumen anual máximo de 150 millones de m³ en 1981 y un mínimo de 78 millones de m³ en el año de 1977.

Subcuenca III Xicohtzingo

En este punto, la determinación de los volúmenes anuales escurridos se realiza por medio del método indirecto del coeficiente de escurrimiento, el cual toma en cuenta las características fisiográficas de la cuenca, además de las lluvias precipitadas en la cuenca conforme a una estación climatológica base.

6.1.3 Infraestructura hidráulica

Actualmente en el estado se cuenta con 15 presas de almacenamiento, con una capacidad total de diseño de 80.781 millones de m³, de las cuales 6 se localizan en la región hidrológica 18; las cuales se muestran en la tabla 3.

Además de las obras descritas existen 20 presas derivadoras, 7 bordos, 16 plantas de bombeo, 15 tomas directas y cuatro galerías filtrantes.

Así mismo en la cuenca Atoyac-Zahuapan existen 688 pozos de los cuales 104 son industriales, 216 de uso público urbano, 40 de uso doméstico-abrevadero, 108 comerciales y de servicios y 220 agrícolas.

Tabla 3. Presas de almacenamiento localizadas en la Región hidrológica 18 (Cuenca Zahuapan).

Nombre de la presa	Capacidad total m ³	Capacidad útil m ³	Uso
Las Cunetas	1080.000	1060.000	R
Atlangatepec	54400.000	50900.000	C, R, P, O
El sol y la luna	1780.000	1500.000	R
El Centenario	760.000	660.000	R
Mariano Matamoros	5400.000	4900.000	C, R, P
Recova	1480.000	1430.000	R

C = Control de Avenidas
 R = Riego
 P = Piscícola
 O = Otros

Figura 5 Plano de ubicación presas de almacenamiento

6.2 Información Socioeconómica

El Estado de Tlaxcala se encuentra dividido en 60 municipios, dentro de estos municipios existen 794 localidades, existiendo un total de 137,412 viviendas habitadas. En la cuenca del río Zahuapan existen 42 municipios de los 60 con los que cuenta el estado, estos representan el 54 % de la superficie total con una extensión estimada de 2,000 km² y descargan directamente al río a través de sus cuencas afluentes.

Población

El conteo de población y viviendas realizadas en el estado cuenta con un total de 883,630 habitantes, de los cuales el 50 % vive en la cuenca del río Zahuapan, además es importante señalar que los cinco municipios más habitados en el estado son: Apizaco, Tlaxcala, Zacateco y Tlaxiaco, los mismos que corresponden al 15 % de la población.

En cuanto a la estructura de edad, la estructura demográfica nos muestra una población mayoritariamente joven. Los niños de 0-14 años de edad para 1990 representaron el 40.7 % de la población (INEGI, 1993).

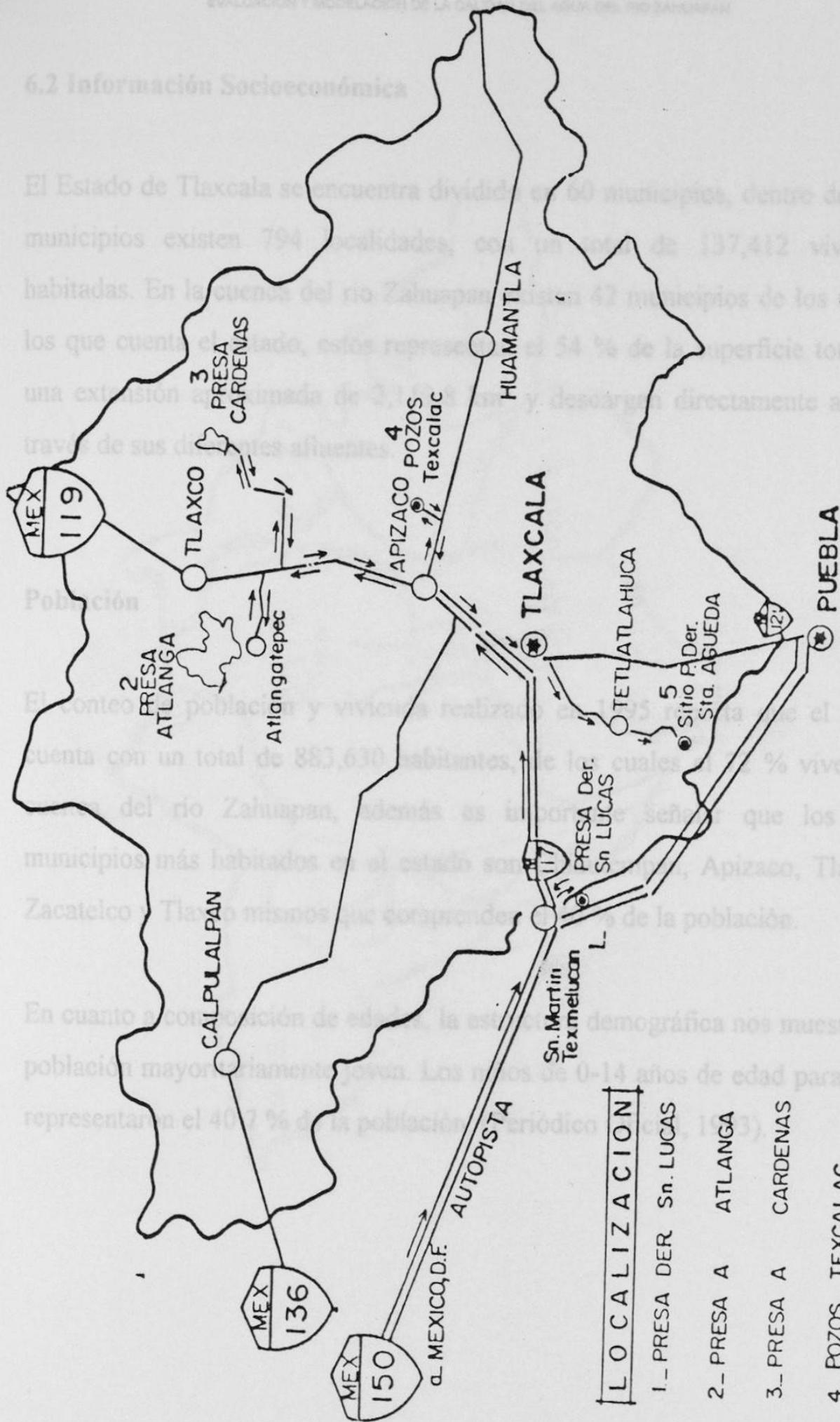


Fig. 5. Presas de Almacenamiento en la RH 18

6.2 Información Socioeconómica

El Estado de Tlaxcala se encuentra dividido en 60 municipios, dentro de estos municipios existen 794 localidades, con un total de 137,412 viviendas habitadas. En la cuenca del río Zahuapan existen 42 municipios de los 60 con los que cuenta el estado, estos representan el 54 % de la superficie total con una extensión aproximada de 2,119.8 km² y descargan directamente al río a través de sus diferentes afluentes.

Población

El conteo de población y vivienda realizado en 1995 reporta que el estado cuenta con un total de 883,630 habitantes, de los cuales el 72 % vive en la cuenca del río Zahuapan, además es importante señalar que los cinco municipios más habitados en el estado son Chiautempan, Apizaco, Tlaxcala, Zacatelco y Tlaxco mismos que comprenden el 40 % de la población.

En cuanto a composición de edades, la estructura demográfica nos muestra una población mayoritariamente joven. Los niños de 0-14 años de edad para 1990, representaron el 40.7 % de la población. (Periódico Oficial, 1993).

Principales Actividades económicas.

La actividad más importante en la entidad es la industria manufacturera, también es de apreciar que el comercio, restaurantes y hoteles es la actividad económica que ocupa el segundo lugar, la tercera actividad relevante se ubica en la agricultura, silvicultura y pesca.

Servicios

El comercio, restaurantes y hoteles tienen una participación en el producto interno bruto de Tlaxcala del orden del 17.2 % ocupando el segundo lugar como actividad económica.

Los municipios más importantes de acuerdo a sus ingresos en el sector servicios son: Apizaco, Chiautempan, Santa Cruz Tlaxcala, Tlaxcala, Yauhquemecan y Zacatelco, representando el 54.8% del total del estado y los principales municipios dentro de la cuenca del río Zahuapan que destacan por sus ingresos en el sector comercio son: Apizaco, Chiautempan, Tlaxcala, Totolac, Yauhquemecan y Zacatelco, los cuales representan un 55.8 % del total del estado.

Tabla 4. Municipios en la cuenca del río Zahuapan (INEGI, 1996)

Municipio	Población actual	Proyección al 2000	Proyección al 2012
1. Amaxac de Guerrero	7,133	8,189	11,031
2. Apetatitlan	10,895	13,255	21,070
3. Apizaco	62,698	73,392	104,279
4. Atlangatepec	4,666	5,357	7,461
5. Cuaxomulco	3,887	4,376	5,816
6. Chiautempan	53,231	65,076	105,403
7. Domingo Arenas	3,781	4,469	6,674
8. Hueyotlipan	12,473	14,530	20,950
9. Ixtacuixtla	28,794	35,201	57,005
10. José Ma. Morelos	7,407	8,218	10,538
11. Juan Cuamatzi	26,744	30,704	42,759
12. Miguel Hidalgo	4,257	4,840	6,579
13. Nativitas	20,245	22,905	30,722
14. Panotla	20,752	23,709	32,637
15. Santa Cruz	11,678	13,472	18,977
16. Teolochoico	15,846	20,032	35,153
17. Tepeyanco	8,672	10,602	16,762
18. Tetla	19,726	26,523	53,968
19. Tetlatlahuca	10,230	11,462	14,756
20. Tlaxcala	61,514	73,413	112,220
21. Tlaxco	30,766	35,439	50,011
22. Tocatlan	4,213	4,583	5,609
23. Totolac	16,80	4,751	18,473
24. Tzompantepec	7,361	8,207	10,656
25. Xalostoc	15,494	18,049	26,029
26. Xaltocan	6,908	7,664	9,835
27. Xicohtzinco	9,486	10,019	11,424
28. Yauquemecan	16,858	20,314	27,307
29. Zacatelco	30,580	35,623	51,384
30. La Magdalena Tlaltelulco	12,551	15,344	20,319
31. San Damian Texoloc	4,102	4,596	5,383
32. San Fco. Tetlanohcan	8,075	9,047	10,601
33. San Jerónimo Zacualpan	3,196	3,581	4,194
34. San José Teacalco	4,581	5,108	5,940
35. San Juan Huactzingo	5,510	6,736	8,918
36. San Lorenzo Acxocomanitla	4,266	4,969	6,145
37. San Lucas Tecopilco	2,819	3,128	3,646
38. Santa Ana Nopalucan	5,302	6,482	10,489
39. Santa Apolonia Teacalco	3,707	4,194	5,633
40. Santa Catarina Ayometla	6,998	8,152	12,157
41. Santa Cruz Quilehtla	4,572	5,073	6,504
42. Santa Isabel Xiloxotla	3,395	4,150	6,715

Sector industrial

Tlaxcala cuenta con 12 áreas industriales que se muestran en la siguiente tabla (SECOFI 1994).

Tabla 5. Areas Industriales dentro de la cuenca del río Zahuapan

Zona industrial	Terreno disponible (has)	Tamaño de las compañías establecidas o que puedan establecerse
1.Ciudad industrial Xicohtencatl	34.5	Medianas a grandes
2.Parque industrial Xiloxoxtla	-----	Pequeñas a medianas
3.Parque industrial Ixtacuixtla	20	pequeñas, medianas o grandes
4.Parque industrial Calpulalpan	53	Pequeñas, medianas o grandes
5.Parque industrial Atlangatepec	21.5	Pequeñas a medianas
6.Parque industrial Tequexquitla	110	Pequeñas a medianas
7.Estación industrial Velasco	20	Pequeñas a medianas
8.Corredor industrial Panzacola	-----	Pequeñas, medianas o grandes
9.Corredor Malinche	105	Pequeñas, medianas o grandes
10.Corredor industrial Apizaco-Xalostoc	100	Pequeñas, medianas o grandes
11.Zona industrial Hueyotlipan	10 (22.5)	Pequeñas a medianas
12.Zona industrial Española	-----	Pequeñas a medianas

Las cuales comprenden 121 empresas con 13,811 empleos generados. Así mismo la Secretaría de Desarrollo Industrial (SEDI 1994) reporta que existen en el estado 273 industrial, de las cuales el 89 % se encuentran en 29 de los municipios que comprenden la cuenca en estudio, teniendo como principal rama la actividad industrial en el giro textil con un 99% de empresas y 8,365 empleos.

Por otra parte de acuerdo a SECOFI (1993), 14 municipios de la cuenca, exportan productos de la industria textil, papel y celulosa, química, alimentos y bebidas, confección, farmacéutica, minerales no metálicos, productos eléctricos, metal básica, hule y plásticos, joyería, cuero y piel y calzado, con 67

empresas que representan el 65.5 % de la capacidad instalada en el estado, con destino a diferentes países de América, Asia, Africa, Europa y Oceanía.

Agricultura, Silvicultura y Pesca

La tercera actividad relevante se ubica en la agricultura, silvicultura y pesca. Tlaxcala es un estado eminentemente agrícola, aunque solo 17 de los 60 municipios se caracterizan por su alta producción de maíz, trigo, cebada, papa, frijol y hortalizas, de ellos únicamente 6 se ubican en la cuenca del Zahuapan: Hueyotlipan, Xaltocan, Españita, Nativitas, Ixtacuixtla y Tetlatlahuca, representando el 32.6% de la superficie laborable de dicha cuenca.

Para 1991, el 91.1 % de la superficie dedicada a actividades agrícolas en el estado era de temporal y apenas el 8.9 % de riego. A su vez el 97.5 % se dedicó a cultivos de ciclo corto y el resto (2.5 %) a plantaciones de maguey y frutales. Prevalece la agricultura de subsistencia, recurriendo al trabajo familiar no asalariado y en determinadas fases del ciclo productivo acudiendo a la solidaridad social, frecuente en las comunidades Tlaxcaltecas.

Se considera que en la cuenca de estudio el 75 % de la producción agrícola se destina al autoconsumo, el 14 % a la venta local o nacional y el resto a exportación, éste último caso señala al municipio de Nativitas caracterizado por ser productor hortícola y único productor de amaranto.

En cuanto a porcentaje territorial ocupado para la agricultura, se observa que el 84.25 % de la superficie estatal es sembrada con maíz, frijol, cebada, trigo y papa; el 13.38 % de la superficie estatal se encuentra cubierta por bosque, principalmente de ocote, sabino, oyamel y encino; y finalmente el 2.37 % de la superficie estatal es pastizal donde se encuentra zacate banderita y zacate navajita.

Ganadería

La ganadería es la segunda actividad del sector agropecuario, con especies como bovinos, porcinos, aves de corral, caprinos y ovinos; los porcinos son los que representan mayor proporción en el estado y en la cuenca, con el 62 % del total; el destino de la producción es para autoconsumo y venta local.

6.3 Información Hidrológica

Aspectos Hidrológicos complementarios

Dentro de la cuenca del río Zahuapan se tienen ubicadas dos estaciones meteorológicas, estas se encuentran ubicadas entre los 15° 19' 00" de latitud norte y los 98° 38' 00" de longitud oeste. Estas estaciones reportan los siguientes datos:

Tabla 6. Temperatura mínima anual (Grados centígrados)

Estación	Periodo	Temperatura promedio	Temperatura año más frío	Temperatura año más caluroso
Tlaxcala	1964-1995	10.1	9.2	13.1
El Carmen	1967-1995	9.3	6.9	12.4

Fuente: INEGI Anuario Estadístico del Estado de Tlaxcala, Edición 1996

Tabla 7. Temperatura mínima mensual (Grados centígrados)

Estación	Periodo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tlaxcala	1995	5.8	6.4	8.3	11.5	13.7	14.4	13.8	14.2	12.5	10.5	8.5	5.7
Promedio	1964-1995	4.7	5.3	8.1	11.4	13.6	14.4	13.6	13.2	12.8	11.2	7.8	5.5
Año más frío	1988	2.7	5.3	8.4	10.3	12.2	14.1	13.2	13.3	11.3	10.2	5.5	4.2
Año más caluroso	1986	16.4	3.9	5.3	10.8	16.3	16.4	15.6	16.1	15.9	15.1	14.3	1.5

Estación	Periodo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
El Carmen	1995	2.3	1.2	5.8	9.7	12.7	10.9	10.0	10.8	10.1	6.0	3.7	0.3
Promedio	1967-1995	4.3	5.2	8.1	10.8	12.6	13.3	11.4	12.3	11.9	10.4	6.6	4.4
Año más frío	1995	2.3	1.2	5.8	9.7	12.7	10.9	10.0	10.8	10.1	6.0	3.7	0.3
Año más caluroso	1978	6.0	8.5	10.	14.4	16.6	17.2	15.8	15.5	13.9	12.5	10.7	8.0

Fuente: INEGI Anuario Estadístico del Estado de Tlaxcala, Edición 1996

Usos actuales del agua

El agua de la corriente en estudio se utiliza únicamente para riego agrícola, principalmente para cultivos del distrito de riego 056 Atoyac-Zahuapan y pequeños ejidos ubicados en la zona sur del estado, pertenecientes al distrito de desarrollo rural 164 de Tlaxcala.

El volumen de agua que es aprovechado en el distrito de riego 056 es de 15.16 millones de m³ (CNA Gerencia Estatal Tlaxcala) para riego de la segunda y tercera unidad (Panotla y Atlangatepec respectivamente).

En la unidad Panotla se tiene una superficie de 1,183 has. Dedicadas principalmente al cultivo de maíz, cebada, alfalfa, haba, frijol y forrajes utilizando un volumen de 10.08 millones de m³ anuales.

En la unidad Atlangatepec la fuente de abastecimiento es la presa Atlanga utilizando un volumen de 5.08 millones de m³ anuales para irrigar una superficie de 417 has. Dedicadas al cultivo de maíz, cebada, trigo y forrajes.

Dentro del distrito de riego rural 164 Tlaxcala, cuatro ejidos son los que aprovechan el agua del río Zahuapan para riego en sus cultivos por medio de 5 represas y una presa, localizadas todas ellas sobre la corriente, con un volumen promedio anual de 14.56 millones de m³, siendo los principales cultivos las hortalizas , maíz y alfalfa.

Tabla 8. Padron de Usuarios de Aguas superficiales en uso Público Urbano, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Volumen anual (m ³)	Subcuenca
1. Sistema Metecatlan	Amamaxac de Gro.	55,503	R. Zahuapan
2. Sistema Tecolotla	Antonio Carbajal	45,096	R. Zahuapan
3. Sistema Belen	Antonio Carbajal	150,111	R. Zahuapan
4. Sistema Apizaco	Apizaco	1,860,624	R. Zahuapan
5. Sistema Apizaquito	Apizaco	84,832	R. Zahuapan
6. Sistema Apatlaco	Panotla	7,569	R. Zahuapan
7. Sistema Huexoyucan	Panotla	150,111	R. Zahuapan
8. Sistema Texantla	Panotla	34,059	R. Zahuapan
9. Sistema Huiloapan	Panotla	250,396	R. Zahuapan
10. Sistema Tetzotzocola	Santa Cruz Tlax.	9,461	R. Zahuapan
11. Sistema Tepetlalcingo	Santa Cruz Tlax.	12,614	R. Zahuapan
12. Sistema Tizatlan	Tlaxcala	216,652	R. Zahuapan
13. Sistema Tlaxco	Tlaxco	349,419	R. Zahuapan
14. Sistema Huexotitla	Tlaxco	27,436	R. Zahuapan
15. Sistema Acopinalco del P.	Tlaxco	3,154	R. Zahuapan
16. Sistema Teopa	Tlaxco	8,199	R. Zahuapan
17. Sistema Xalostoc	Tlaxco	31,536	R. Zahuapan
18. Sistema Huixcolotepec	Xaltocan	126,144	R. Zahuapan
19. Sistema Acuixcuixcatepec	Xaltocan	76,632	R. Zahuapan
20. Sistema Yauhquemecan	Yauhquemecan	463,579	R. Zahuapan
21. Sistema Atencingo	Yauhquemecan	21,129	R. Zahuapan
22. Sistema Xaltocan	Yauhquemecan	209,714	R. Zahuapan
23. Sistema Ursula Z.	Yauhquemecan	78,525	R. Zahuapan

Fuente: CNA, Padrón de Usuarios, Gerencia Estatal Tlaxcala

Tabla 9. Padrón de Usuarios de Aguas superficiales RH 18 “Alto Balsas”, en uso agrícola.

Nombre de URDERAL	Volumen titulado	Hectáreas	Municipio
1. Palo Huérfano M	108,000	18-00-00	Amaxac de Gro.
2. Amaxac No. 3 PB	204,060	34-01-00	Amaxac de Gro.
3. El molino Deriv.	93,024	15-50-40	Amaxac de Gro.
4. La trinidad PD	360,000	60-00-00	Amaxac de Gro.
5. Metecatlan	240,000	40-00-00	Amaxac de Gro.
6. Belen PD	27,006	04-50-01	Antonio Carbajal
7. Cuahutle	60,000	10-00-00	Antonio Carbajal
8. Tlatempan	142,500	19-00-00	Antonio Carbajal
9. Las cunetas PA	738,000	123-00-00	Apizaco
10. Vecinos San Luis A.	453,600	—	Apizaco
11. Atlangatepec PB	1507,500	251-25-0	Atlangatepec
12. El sol y la luna	721,000	123-32-16	Hueyotlipan
13. Jaguey Sn. Fco.	181,500	30-25-00	Hueyotlipan
14. Jaguey Sn. Manuel	110,000	17-00-00	Hueyotlipan
15. Presa de torres	97,500	18-25-00	Hueyotlipan
16. Rosario PB	882,660	147-11-00	Ixtacuixtla
17. Trinidad No.2 PD	796,233	132-721	Ixtacuixtla
18. Xochitecatitla	560,190	—	Nativitas
19. Grande PA	360,001	60-08-00	Tepeyanco
20. Huactzingo Deriv.	210,000	35-00-00	Tepeyanco
21. Zacamana Deriv.	420,000	70-00-00	Tepeyanco
22. Tetla PB	1118,820	186-47-00	Tetla
23. Santa Ana Portales	1039,500	173-25-00	Tetlatlauca
24. Tetlatlahuca Deriv.	895,500	482-75-00	Tetlatlauca
25. Molinito	480,000	0-00-00	Tlaxcala
26. Totolac P Deriv.	480,000	800-00	Totolac
27. San Diego Deriv	480,318	80-30	Tzompantepec
28. La Barbosa	552,000	92-00-00	Xicohtzinco
29. Atlihuetzia PD	300,000	50-00-00	Yahuquemecan
30. Atlihuetzia PB	204,102	34-01-20	Yahuquemecan
31. Riego Derivación	159,950	26-66-00	Yahuquemecan
32. Zacatepec	287,052	47-84-20	Yahuquemecan
33. Ametoxtla PB.	709,518	118-00-00	Zacatelco
34. Ateozintla	342,162	57-02-70	Zacatelco
35. Cuacualoya	2100,000	350-00-00	Zacatelco
36. Santa Agueda PD	2916,000	486-00-00	Zacatelco
37. Xostla Derivación	360,000	60-00-00	Zacatelco

Fuente: CNA, Padrón de usuarios, Gerencia Estatal Tlaxcala

Tabla 10. Padrón de Usuarios por uso industrial de aguas superficiales, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Vol. anual	Fuente de Aprovechamiento
1. Loreto y Peña Pobre	Yauhquemecan	294,000	Manantial Atlixteca
2. Textiles Tenexac	Xicohtencatl	6,000	Manantial S/N

Tabla 11. Padrón de Usuarios por uso comercial y servicios de aguas superficiales, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Vol. anual	Fuente de Aprovechamiento
1. IMSS Trinidad	La Sta. Cruz Tlaxcala	86,400	Río Tequixquiatl
2. IMSS Trinidad	La Sta. Cruz Tlaxcala	36,835	Manantial S/N
3. Baños Cruz el P.	T. Sta. Ixtacuixtla	39,420	Manantial La Cienega
4. Balneario Pinos	los Chiautempan	10,091	Manantial S/N
5. FFCC Apizaco	Est. Apizaco	126,144	Manantial Actipa
6. Balneario Huerfano	Palo Amaxac de Gro	9,305	Manantial Atotonilco

Tabla 12. Padrón de Usuarios por uso en acuacultura de aguas superficiales, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Vol. anual	Fuente de Aprovechamiento
1. Delegación Pesca	Atlangatepec	262,800	Presa Atlanga

Tabla 13. Padrón de Usuarios por uso Doméstico-Abrevadero de aguas superficiales, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Vol. anual	Fuente de Aprovechamiento
1. Adolfo Sánchez Anaya	Tlaxco	985	Manantial Toltecapa
2. Jorge Calderón Herrera	Ixtacuixtla	1,895	Manantial S/N

Tabla 14. Padrón de Usuarios por uso de Riego Particulares-DTO de aguas superficiales, RH 18 Alto Balsas

Usuario	Municipio	Vol. anual	Fuente de Aprovechamiento
1. Alfonso Sánches	Tlaxco	31,536	Manantial Toltecapa
2. Ema García F.	Apizaco	12,960	Río Atenco
3. Rafael Sánchez C.	Españita	18,144	Bca. El Bautisterio
Distrito de riego 056			
4. Modulo IV Canal	Panotla	598,000	Río Zahuapan
5. Modulo V Canal	Atlangatepec	2 846,000	Río Zahuapan (P. Atlanga)

Fuentes de Contaminación

La contaminación del agua consiste en la degradación de sus características físicas, químicas y/o biológicas; provocadas principalmente por causas naturales o como consecuencia de las actividades humanas.

Sea cual fuere la forma de evacuación utilizada para estas aguas, dará origen a la aparición de fenómenos de contaminación en grado variable, que serán tanto más intensos cuanto menor sea el grado de depuración de las aguas usadas.

De manera natural el agua de lluvia absorbe los gases y vapores que se encuentran normalmente presentes en la atmósfera, barre las partículas del aire y cuando la lluvia humedece la superficie de la tierra, el agua empieza a adquirir las propiedades que le caracterizan los elementos con los que tiene contacto. Con el tiempo el agua superficial, en la misma forma que el escurrimiento de la lluvia, penetra en estanques, lagos, ríos y finalmente mares.

En principio las aguas residuales pueden dividirse en dos grandes grupos: aguas residuales domésticas o municipales y aguas residuales industriales (Federico de Lora Soria 1978).

Aguas residuales municipales.

Aguas residuales fruto de la actividad normal de los habitantes de un núcleo urbano y que provienen preferentemente de los retretes, cocinas y baños. Si el sistema de alcantarillado es unitario, algunas veces estas aguas están mezcladas

con las de lluvia, que arrastran y disuelven las materias presentes en las vías urbanas.

Aguas residuales industriales.

Su composición es tan variable que no se puede dar una composición media, en algunas industrias predominan los compuestos orgánicos mientras que en otras prevalecen los inorgánicos. En cuanto a sus propiedades físicas hay sustancia insolubles en el agua, que forman suspensiones mientras que otras son solubles u oleaginosas. Según el tipo de industria predominarán unos determinados compuestos químicos. Por lo tanto es preciso estudiar cada caso concreto por separado.

Por su parte Clarence J. Velz, (1970) dice que pueden clasificarse las diferentes formas de contaminación en cinco tipos principales:

1. Aguas residuales de tipo orgánico.
2. Aguas residuales con un alto contenido microbiológico.
3. Aguas radioactivas.
4. Aguas residuales de tipo inorgánico.
5. Aguas residuales con una temperatura muy elevada.

Dentro del estado de Tlaxcala se generan aproximadamente 45 millones de m³ al año (1,416 lps) de aguas residuales, de las cuales 35 millones de m³ al año (1,080 lps) son de origen doméstico y los restantes (336 lps) provienen de la industria. Del total se vierten sin tratamiento previo 788 lps a cuerpos receptores (775 lps domésticos y 13 lps industriales), que actualmente representan 30 millones de m³ al año, recibiendo únicamente tratamiento el 32 % de las aguas que se generan (CNA Programa Hidráulico 1995-2000).

Se cuenta con 40 sistemas de tratamiento de aguas residuales, de ellas opera 6 la Coordinación General de Ecología (CGE) y 34 los municipios, mismas que cuentan con una capacidad instalada de 910 lps; sólo que por diversas circunstancias sólo tratan 305 lps de origen doméstico, así como 170 lps de origen industrial; por otra parte la industria trata otros 153 lps directamente, a través de plantas de tratamiento de diversos tipos.

Descargas Municipales

De la cortina de la presa Atlangatepec hasta la confluencia con el río Atoyac, el río Zahuapan recibe las descargas de aguas residuales de 42 municipios, los cuales descargan directamente al río, o por medio de sus afluentes, alterando de manera significativa la calidad del agua de dicha corriente.

Son 94 las descargas de tipo doméstico o municipales que existen en la cuenca de este río, 9 de las cuales reciben tratamiento antes de ser descargadas, con un volumen tratado de 19,5 millones de m³ por año.

Descargas Industriales

El río Zahuapan además de recibir las descargas municipales, recibe también las descargas de aguas residuales de los principales asentamiento industriales comprendidos en los diferentes parques, corredores y zonas industriales.

46 industrias descargan directamente al cuerpo receptor, cuyos giros son: papelera, química, textil, metal-mecánica, plásticos y componentes eléctricos.

Control de las fuentes de contaminación

Cuando se arrojan aguas residuales, sin depurar, a un río, se producen daños de diversos tipos que, en mayor o menor grado, afectan a los diversos usos del agua corriente aguas abajo del punto donde se efectúan los vertidos. La magnitud de estos daños depende del volumen del vertido, de su concentración en materias o especies biológicas y del caudal del río receptor.

El grado de tratamiento que se necesita en estas descargas depende especialmente del estado y utilización posterior de la corriente receptora. Un tratamiento excesivo de los vertidos, constituye una pesada carga; si el tratamiento es menos de lo necesario, es sólo una pérdida de esfuerzo y de

dinero. Por lo tanto se comprende fácilmente, el valor de calcular, tan exactamente como sea posible, las cargas contaminantes que se puedan verter, sin crear problemas en un curso de agua.

Plantas de tratamiento de descargas municipales

Las principales plantas de tratamiento municipales que descargan al río Zahuapan son cuatro, estas aportan el mayor porcentaje de volumen descargado al cuerpo receptor.

1.Unidad Apizaco “A”

Esta planta consiste en dos lagunas aeradas, una laguna facultativa y una laguna de maduración, con un gasto de 110 lps, da servicio principalmente a poblaciones comprendidas dentro del municipio de Apizaco.

2. Unidad Apizaco “B”

Esta planta consiste en cuatro filtros biológicos, dos sedimentadores primarios y dos sedimentadores secundarios, operando con un gasto de 120 lps, da servicio a 4 localidades: Apizaco, Zimatepec, Yauhquemecan y San Benito Xaltocan, además de prestar servicios a 15 empresas.

3. Unidad Tlaxcala

Consta de 4 lagunas aereadas, operando con un gasto de 30 lps, da servicio a 16 localidades: Tlaxcala, Ixtulco, Atempa, Tizatlan, Chimalpa, Chiautempan, Cuahuxmatla, Ixcotla, Tepeticpac, Tenotlalpan, Ocotelulco, Ixcotla del río, Tlamahuco, Quiahuitlan y Trinidad Chimalpa, además de prestar el servicio a 61 industrias donde predomina la rama textil,

4. Apetatitlan

Consta de 2 lagunas de estabilización, operando con un gasto de 10 lps, da servicio a 7 localidades: San Pablo Apetatitlan, Tlatempa, Tecolotla, Contla, Santa Cruz Guadalupe, Guadalupe Ixcotla y Chalma, , además de 13 industrias.

5. Panotla

Esta planta consiste en 2 lagunas de estabilización, las localidades beneficiadas son Panotla, 23 zona militar y Fraccionamiento Santa Elena, con un gasto de 7 lps.

Tabla 15. Principales plantas de tratamiento municipales en cuanto a volumen tratado

Identificación de la planta	Tratamiento	Capacidad instalada (m3/scg)	No. de habitantes beneficiados
Apizaco "A"	Lagunas aereadas	.1000	21347
Apizaco "B"	Filtros biológicos	.1800	43966
Tlaxcala	Lagunas aereadas	.2500	94471

Fuente: CNA, 1996, Inventario de Plantas de Tratamiento, Subgerencia Técnica

Plantas de tratamiento de descargas industriales

En el siguiente cuadro se presentan las empresas cuya descarga tratada es la más representativa dentro de la zona de estudio

Tabla 16. Descargas de aguas residuales industriales tratadas al río Zahuapan

Razón social	Giro	Tratamiento	Volumen Tratado (m ³ /día)
ATLAX Celulosa de fibras Mexicanas	Metal básica Papelerera	Lodos activados Floculación	2,160 2,178
Centro vacacional IMSS Trinidad	Recreativo	Lodos activados-Fosa séptica	144.4
Forjas Spicer. Granitos naturales	Metal básica Mineral no metálica	Biodiscos Sedimentación	1,250 266.7
BETA HOVOMEX Industria Química del Istmo	Papelerera Química	Flotación Neutralización-Lodos activados	1,427 130
Leche industrializada CONASUPO	Leche y derivados	Lodos activados	259.6
Loreto y Peña Pobre poliestireno y derivados	Papelerera Plásticos	Filtros biológicos Neutralización-Fosa séptica	4,000 583
Schneider Electric de México	Componentes eléctricos	Floculación-Lodos activados	160

Fuente: CNA, 1996, Gerencia Estatal en Tlaxcala, Subgerencia Técnica.

7. MODELACION MATEMÁTICA

7.1 Selección del modelo (criterios)

Como se mencionó anteriormente dentro de la planeación de la calidad del agua se han desarrollado modelos que simulan el comportamiento de una corriente. El modelo de calidad del agua cubre un amplio ámbito de análisis con variaciones en la cantidad del agua, condiciones de la corriente y variaciones en el tiempo.

Las expresiones matemáticas utilizadas para realizar el presente estudio son las de Streeter y Phelps, que han sido simplificadas en un sistema de computo denominado SICLACOR que simula el comportamiento real de una corriente (sistema actualmente usado en la CNA .)

Por medio del sistema SICLACOR modificado en una hoja de cálculo en excel 6.0 de Microsoft para poder tener un mejor manejo de los datos suprimiendo alguna limitaciones con el, se determina el oxígeno de saturación, el déficit inicial de oxígeno, déficit crítico, tiempo crítico, carga real de materia orgánica, carga orgánica asimilable y el porcentaje de remoción de materia orgánica.

Para simular la calidad del agua en corrientes superficiales, es común centrarse principalmente en el comportamiento del oxígeno disuelto ante la presencia de materia orgánica proveniente de distintos tipos de descarga, en virtud de que el

contenido de oxígeno disuelto es fundamental para el sostenimiento de la vida acuática aerobia, así como para cualesquiera de los usos a que el agua se destine.

Al efectuar el balance de oxígeno este modelo considera solamente las principales entradas y salidas, la solubilidad en función de la temperatura y la remoción debida a la actividad microbiana (DBO sobre la materia orgánica carbonosa). De tal manera que tomando como principales parámetros la DBO y OD las expresiones matemáticas de Streeter y Phelps permiten manejar los datos de la corriente para simular su comportamiento obteniendo las constantes K_D , K_1 y K_2 para el río Zahuapan.

En cambio modelos más detallados incluyen además la producción de oxígeno por la actividad fotosintética, la remoción por oxidación del nitrógeno amoniacal en el proceso de nitrificación, por la demanda bioquímica de oxígeno de los sedimentos, por la respiración de algas o algunos otros parámetros distintos que pueden o no estar relacionados con el oxígeno disuelto. Obviamente que mientras más parámetros puedan ser simulados por un modelo, mayor es su utilidad en programas de administración de la calidad del agua, pero su calibración y validación deben estar soportados por una base de datos adecuada y confiable.

7.2 División de la corriente

A lo largo de la corriente se localizaron 109 puntos de monitoreo los cuales consisten en 14 extracciones, 21 descargas, 28 afluentes y 46 puntos que se tomaron como representativos por tener un gasto considerable o valores de DBO y DQO altos sobre el río Zahuapan.

La corriente se dividió en 10 tramos considerando las distancias existentes entre los puntos de monitoreo, altitudes sobre el nivel del mar, el tipo de aprovechamiento, extracción o aportación y el efecto de la carga contaminante que recibe el cuerpo receptor.

El estudio de caracterización se realizó a partir de la confluencia del río Zahuapan con la barranca “la ladera”, tomando en cuenta que después de este punto se encuentran las primeras descargas considerables.

Las estaciones de monitoreo y la división por tramos se muestra en la siguiente tabla.(Se presentan solo los puntos principales sin mostrar las estaciones que se tomaron aguas arriba y aguas abajo de los mismos)

Tabla 17. Estaciones de monitoreo y división por tramos

Tramo	Descripción	Distancia m	DBOu mg/l	Longitud m
1	Río Zahuapan confluencia barranca "la ladera"	0.00	35.64	6,100
	Barranca Texopa-Tlaxcantitla (MD)	3,250	17.85	
	Barranca Analco (MD)	1,925	28.32	
	Barranca S/N	925	65.12	
	Río Zahuapan a. abajo Barranca S/N			
2	Río Zahuapan a. arriba Barranca S/N A (Xaltocan)			10,775
	Barranca S/N A (Xaltocan)	3,025	128029	
	Descarga Xaltocan (MD)	325	305.85	
	Barranca S/N B (Xaltocan) (MD)	250	350.99	
	Barranca Zacatepec (MI)	3,450	47.08	
	Manantiales San Dionisio (MI)	1,900	11.52	
	Descarga 1 Planta de Trat. Apizaco "B" (MI)	1,600	119.82	
	Descargas 2 Planta de Trat. Apizaco "B" (MI)	75	304.58	
	Arroyo San Benito o Atlixtac (MI)	150	63.91	
Río Zahuapan a. abajo Arroyo San Benito				
3	Río Zahuapan a. arriba Arroyo Huacaltzingo			6,075
	Arroyo Huacaltzingo (MI)	1,000	331.63	
	Planta de bombeo Atlihuetzia (MD)	1,525	95.34	
	Drenaje de riego Atlihuetzia (MD)	350	87.63	
	Derivación Atlihuetzia (MD)	1,100	107.36	
	Presa Metecatlan (MI)	2,000	57.73	
	Descarga Atlihuetzia (Fosa séptica) (MD)	100	339.8	
Río Zahuapan a. abajo Descarga Atlihuetzia				
**	Cascada Atlihuetzia 20 m de caída			
4	Río Zahuapan a. arriba Descarga Hotel Misión			475
	Descarga Hotel Misión (MD)	350	343.15	
	Río Ocotoxco (MD)	125	82.42	
	Río Zahuapan a. abajo Río Ocotoxco			
5	Río Zahuapan a. arriba Manantiales Palo Huerfano			5,725
	Manantiales Palo Huerfano (MI)	850	11.81	
	Arroyo excedentes de riego manantiales Palo H.	175	24.51	
	Río Atenco o Tequisquial (MI)	900	29.53	
	Derivación Belen (MD)	200	51.40	
	Río dos arroyos (MI)	1,000	21.46	
	Manantiales Belen (MI)	825	11.29	
	Arroyo Metlahuapan (MI)	1,025	14.84	
	Manantiales el molinito (MD)	500	7.87	
Arroyo S/N (MD)	250	13.23		
Río Zahuapan a. abajo Arroyo S/N				

Tramo	Descripción	Distancia	DBOu	Longitud
6	Río Zahuapan a. arriba Descarga Contla			8,600
	Descarga Contla (MI)	675	284.12	
	Descarga Lag. De Ox. San Pablo Apetatitlan (MI)	75	413.66	
	Barranca El Cristo	950	7	
	Río Los Negros	1,100	164.75	
	Descarga cruda No. 1 de Tlaxcala	1,550	1,052.98	
	Descarga cruda No. 2 de Tlaxcala	325	363.75	
	Descarga cruda No. 3 de Tlaxcala	350	829.98	
	Descarga cruda No. 4 de Tlaxcala	300	743.43	
	Barranca Totolac (MD)	1,300	990.99	
	Descarga 1 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	175	619.44	
	Descarga 2 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	100	693.51	
	Descarga 3 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	75	297.74	
	Descarga Totolac	275	447.34	
	Planta de Bombeo Panotla (MD)	1,200	228.36	
	Canal lateral derecho Presa Panotla	100	228.36	
Canal lateral izquierdo Presa Panotla	50	228.36		
Río Zahuapan a. abajo Canal lateral izq. Presa P.				
7	Río Zahuapan a. arriba Descarga Laguna de Ox. P.			6,200
	Descarga Laguna de Ox. Panotla (MD)	3,325	145.93	
	Barranca Monterrey (MI)	1,925	364.91	
	Río Totolac (MI)	950	188.33	
Río Zahuapan a. abajo Río Totolac				
8	Río Zahuapan a. arr. Represa Ejido Sta. Apolonia			4,225
	Represa Ejido Santa Apolonia (MD)	3,700	192.17	
	Descarga No. 1 quesería Tetlatlahuca (MI)	150	729.82	
	Descarga No. 2 quesería Tetlatlahuca (MI)	150	706.34	
	Descarga Tetlatlahuca (MI)	225	1,141.32	
Río Zahuapan a. abajo Descarga Tetlatlahuca				
9	Río Zahuapan a. arr. Represa 1 Ejido Tetlatlahuca			4,850
	Represa 1 ejido Tetlatlahuca (MI)	425	206.34	
	Represa 1 ejido La Concordia (MD)	725	202.57	
	Represa 2 Ejido Tetlatlahuca (MI)	50	202.57	
	Represa 3 ejido Tetlatlahuca (MI)	1,575	194.74	
	Represa 2 ejido La Concordia (MD)	175	194.25	
	Presa Santa Agudea	1,900	191.18	
Río Zahuapan a. abajo Presa Sta. Agueda				
10	Río Zahuapan a. arriba Río Viejo			6,975
	Río Viejo (MI)	4,225	70.56	
	Barranca de Guardia (MI)	900	81.09	
	Barranca Corazón de Jesús (MI)	200	235.41	
	Barranca S/N (MD)	250	164.85	
	Descarga San Buena Ventura (MI)	1,250	534.96	
	Descarga Corredor industrial Xicotzinco (MI)	150	59.85	
	Río Zahuapan antes de la confluencia con el Atoyac	100	115.96	

7.3 Gasto de diseño

Se obtuvo la información de gasto en el río Zahuapan mediante las dos estaciones hidrométricas existentes en el tramo de estudio, (estaciones Tlaxcala y Xicohtzinco del servicon hidrométrico de la CNA, Gerencia Estatal en Tlaxcala) tomándose el promedio de los siete días consecutivos más secos mensuales y anuales registrados en un periodo de 10 años.

Los datos obtenidos fueron:

Estación Tlaxcala : 0.888 m³/seg

Estación Xicohtzingo 0.345 m³/seg

Para el estudio de caracterización del río Zahuapan se tomó el valor de la estación Xicohtzingo como el gasto de diseño por considerarse un valor crítico.

7.4 Balance hidráulico

Mediante la información hidrométrica de la cuenca, el gasto de diseño empleado para el estudio y los aforos correspondientes se efectuó el balance hidráulico, comprobando que el gasto de un tramo cualquiera sea sensiblemente igual al gasto del tramo anterior más las aportaciones y menos las extracciones existentes.

$$Q' = Q + A - E$$

Donde:

Q' = Gasto de la corriente después de la descarga o extracción

Q = Gasto de la corriente antes de la descarga o extracción

A = Aportaciones

E = Extracciones

El balance hidráulico efectuado se presenta en la siguiente tabla

Tabla 18. Balance Hidráulico por tramos

Tramo	Gasto inicial m³/s	Aporte m³/s	Extracción m³/s	Gasto final m³/s
1	0.0346	0.0070	0	0.0416
2	0.416	0.1577	0	0.1993
3	0.1993	0.0081	-0.0350	0.1724
4	0.1724	0.0330	0	0.2054
5	0.2054	0.3905	-0.0013	0.5946
6	0.5946	0.3598	-0.4187	0.5357
7	0.5357	0.1310	0	0.6667
8	0.6667	0.0133	-0.0130	0.6670
9	0.6670	0	-0.4894	0.1776
10	0.1776	0.1844	0	0.3620

7.5 Consideraciones que se realizaron al correr el modelo

Los tramos se dividieron en general de acuerdo a: distancias, aportaciones, extracciones y carga contaminante.

Se agruparon las descargas, afluentes y/o extracciones que no tenían un efecto significativo en el cuerpo receptor, es decir la concentración de materia orgánica en el río se mantenía prácticamente constante.

En el tramo 4 se reinicia la modelación ya que antes de este se encuentra la cascada Atlihuetzia, de aproximadamente 20 m de caída.

Para calcular el gasto de los aprovechamientos (extracciones), se uso el número de hectáreas regadas.

Para el caso de las plantas de tratamiento de tipo municipal, el gasto se calculó en base a la cobertura de población, ya que el gasto en estas descargas es muy variable.

En el tramo 5, para el Río Atenco o Tequisquiatl, se usó la DBO resultante del estudio de clasificación de este río (CNA, 1995).

7.6 Formulación de Resultados

Afluentes

Son 28 los afluentes del río Zahuapan (Tabla 19), de los cuales 12 son barrancas, 4 manantiales, 5 arroyos, 6 ríos y un drenaje de riego, de éstos se consideran de mayor importancia los ríos Atenco, Totolac y río Viejo, por su volúmen de aportación, los que contribuyen con la mayor contaminación son: el

río de Los Negros, barranca Totolac, barranca Monterrey, río Totolac y barranca Corazón de Jesús, esto debido a que en su cauce circulan en su mayoría aguas residuales que son vertidas aguas arriba sin tratamiento.

Por otro lado se encuentran los manantiales, cuya contaminación puede considerarse muy baja no afectando de forma negativa al cauce del río Zahuapan, excepto en coliformes que arrojan resultados muy altos (4×10^5 NMP/100 ml).

Descargas

Las descargas de aguas residuales son 21 (Tabla 20), de las cuales 17 son de origen municipal, una de servicios y 3 industriales. Es importante observar que las descargas que aportan mayor volúmen son las de ECCAET, tanto en la ciudad de Tlaxcala como en la ciudad de Apizaco, con niveles de contaminación considerablemente altos.

Aprovechamientos

Los aprovechamientos existentes a lo largo del tramo en estudio son 14 divididos de la siguiente manera (Tabla 21): 2 plantas de bombeo, 5 presas derivadoras (para la presa derivadora Panotla se consideraron los canales laterales por separado) y 6 tomas derivadoras; de estas las de mayor importancia en la zona, tanto por el volúmen de extracción como por la

superficie beneficiada son: la Presa Panotla con dos canales de derivación y la Presa Santa Agueda, así como las tomas 1 del ejido La Concordia y la toma No. 1 del ejido Tetlatlahuca.

Tabla 19. Afluentes del Río Zahuapan

No.	Descripción	Gasto m ³ /s	DBO ₅ mg/l	DBO _u mg/l
1	Barranca Texopa- Tlaxcantitla	0.001	14.75	17.85
2	Barranca Analco	0.001	23.4	28.32
3	Barranca S/N	0.005	53.8	65.12
4	Barranca S/N A (Xaltocan)	0.0003	106	128.29
5	Barranca S/N B (Xaltocan)	0.0001	290	350.99
6	Barranca Zacatepec	0.005	38.9	47.08
7	Arroyo San Benito o Atlixteca	0.048	52.8	63.91
8	Arroyo de Huacaltzingo	0.006	274	331.63
9	Drenaje de riego Atlihuetzia	0.0013	72.4	87.63
10	Río Ocotoxco-Tlatlahuquitepec	0.03	68.1	82.42
11	Arroyo exedentes de riego mananatial P.H.	0.001	20.25	24.51
12	Río Atenco o Tequisquiatl	0.36		29.53
13	Río Dos Arroyos	0.01	17.73	21.46
14	Arroyo Metlahuapan	0.015	12.26	14.84
15	Arroyo S/N	0.01	10.93	13.23
16	Barranca El Cristo	0.005	5.79	7.0
17	Río Los Negros	0.0076	136.12	164.75
18	Barranca Totolac	0.008	818.78	990.99
19	Barranca Monterrey	0.008	301.5	364.91
20	Río Totolac	0.1169	155.6	188.33
21	Río Viejo	0.11	58.3	70.56
22	Barranca de Guardia	0.038	67	81.09
23	Barranca Corazón de Jesús	0.019	194.5	235.41
24	Barranca S/N (Drenaje de riego)	0.0014	136.2	164.85
25	Manantiales San Dionicio	0.001	9.52	11.52
26	Manantiales Palo Huerfano	0.004	9.76	11.81
27	Manantiales Belen	0.0005	9.33	11.29
28	Manantiales El Molinito	0.008	6.5	7.87

Tabla 20. Descargas al Río Zahuapan

No.	Descripción	Tipo	Gasto m ³ /s	DBO5 mg/l	DBOu mg/l
1	Descarga Xaltocan	Municipal	0.0063	252.7	305.85
2	Descarga 1 Planta de Tratamiento Apizaco "B"	Combinada	0.095	99	119.82
3	Descarga 2 Planta de Tratamiento Apizaco "B"	Combinada	0.002	251.65	304.58
4	Descarga Atilhuetzia (Fosa Séptica)	Municipal	0.0008	280.75	339.80
5	Descarga Hotel Misión	Servicios	0.003	286	346.15
6	Descarga Contla	Municipal	0.001	234.75	284.12
7	Descarga Laguna de Ox. San Pablo Apetatitlán	Municipal	0.01	341.78	413.66
8	Descarga Cruda No. 1 de Tlaxcala	Municipal	0.01	870	1052.98
9	Descarga Cruda No. 2 de Tlaxcala	Municipal	0.0015	300.54	363.75
10	Descarga Cruda No. 3 de Tlaxcala	Municipal	0.005	685.75	829.98
11	Descarga Cruda No. 4 de Tlaxcala	Municipal	0.002	614.24	743.43
12	Descarga No. 1 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	Combinada	0.2057	511.8	619.46
13	Descarga No. 2 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	Combinada	0.01	573	693.51
14	Descarga No. 3 Planta de Trat. ECCAET Tlaxcala	Combinada	0.089	246	297.74
15	Descarga Totolac	Municipal	0.005	369.6	447.34
16	Descarga laguna de Ox. Panotla	Municipal	0.007	120.58	145.94
17	Descarga No. 1 quesería Tetlatlahuca	Industrial	0.005	603	729.82
18	Descarga No. 2 quesería Tetlatlahuca	Industrial	0.0003	583.6	706.34
19	Descarga Tetlatlahuca	Combinada	0.008	943	1141.33
20	Descarga San Buena Ventura	Municipal	0.002	442	534.96
21	Descarga Corredor industrial Xicotzingo	Industrial	0.006	49.45	59.85

Tabla 21. Aprovechamientos en el Río Zahuapan

No.	Descripción	Tipo	Capacidad	Superficie Beneficiada
1	Planta de Bombeo Atilhuetzia	Presa Derivadora	0.009	34
2	Derivación Atilhuetzia	Presa Derivadora	0.014	50
3	Presa Metecatlan	Presa Derivadora	0.012	40
4	Derivación Belen	Presa Derivadora	0.0013	4.5
5	Planta de Bombeo Panotla	Planta de Bombeo	0.0057	20
6	Canal lateral derecho Presa Panotla	Presa Derivadora	0.373	1382
7	Canal lateral izquierdo Presa Panotla	Presa Derivadora	0.04	138
8	Represa Ejido Santa Apolonia	Toma Derivadora	0.013	43
9	Represa 1 Ejido Tetlatlahuca	Toma Derivadora	0.14	482
10	Represa 1 Ejido La Concordia	Toma Derivadora	0.13	438
11	Represa 2 Ejido Tetlatlahuca	Toma Derivadora	0.0144	50
12	Represa 3 Ejido Tetlatlahuca	Toma Derivadora	0.025	88
13	Represa 2 Ejido La Concordia	Toma Derivadora	0.04	138
14	Presa Santa Agueda	Presa Derivadora	0.14	486

7.6.1 Integración de Información Básica

Con los resultados de laboratorio obtenidos, división de la corriente, ubicación de las extracciones, afluentes, aforos del río y el balance hidráulico, se aplicó el modelo matemático, para poder obtener los coeficientes y constantes, el balance de carga, capacidad de asimilación y dilución del río.

En las siguientes tablas se integra la información básica para correr el modelo.

Tabla 22. Integración de la Información Básica por Tramos

Tramo	Velocidad m/s	Longitud m	O.D. inic. Mg/l	Temperatura del agua en °C	Pres. Atmosférica mmHg
1	0.0500	6,100	5.40	16	580.00
2	0.0933	10,775	4.30	18	580.00
3	0.2018	6,075	3.28	17	580.00
4	0.1915	475	5.56	17	580.00
5	0.1726	5,725	5.20	19	580.00
6	0.3351	8,600	4.30	18	580.00
7	0.1707	6,200	3.30	18	580.00
8	0.1733	4,225	3.70	19	580.00
9	0.1115	4,850	1.82	22	580.00
10	0.1617	6,975	3.90	20	580.00