

174



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

SANEAMIENTO DEL RÍO ATOYAC
MODELO Y APLICACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

PUENTE LUÉVANO GABRIELA

MÉXICO, D.F.

2000





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO SEGUN EL TEMA..

PRESIDENTE

RODOLFO TORRES BARRERA

VOCAL

LANDY IRENE RAMIREZ BURGOS

SECRETARIO

FULVIO MENDOZA ROSAS

1er. SUPLENTE

JOSE LUIS LOPEZ MARTINEZ

2do. SUPLENTE

JOSE SABINO SAMANO CASTILLO

SITIOS DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

Instituto de Ingeniería de la UNAM

Instituto de Ecología Aplicada del Edo. de Guerrero

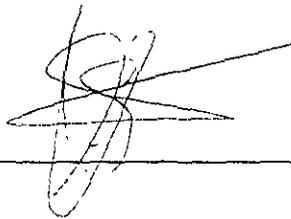
Director de la tesis:

M. en I. Fulvio Mendoza Rosas



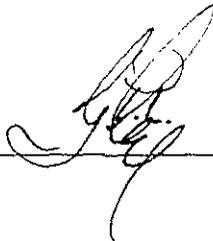
Supervisor Técnico:

M. en I. Adrián Jiménez Varela



Sustentante:

Gabriela Puente Luévano



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, agradezco y dedico este documento por su incomparable apoyo, amor y ejemplo. A ti papá por todas las cosas que hiciste buscando aligerar mi carga, y a tí mamá por la cantidad de palabras de aliento que me expresaste cuando declinaba en mi objetivo; creo en verdad, que las cosas no se logran por simple responsabilidad, siempre hay alguien por quién hacer y a quién dar. Gracias a Dios que los tengo a ambos; esto es el producto de nuestro esfuerzo.

A Jorge Luis y a Francisco Daniel, quienes me han sido realmente hermanos; de sangre, de palabra, de acción, y de convivencia. Los quiero mucho y deseo que este trabajo sea el primero de tres y no el único.

A mi Director de Tesis, que por el
empeño y honestidad en su trabajo;
impacta a quién se cruza en su camino.

A mi amado esposo, quién es un ser
excepcional. Fulvio te amo.

A mis familiares: abuelos, tíos y primos por compartir conmigo todas las etapas que he vivido, brindándome su aprecio y su cariño.

A mis amigos de días enteros en la Universidad. Siempre los tendré presentes.

A los maestros de la Facultad de Química por compartirme sus conocimientos formándome académicamente.

Al Instituto de Ecología Aplicada del Estado de Guerrero, por impulsar la formación de recursos humanos, que me ha permitido colaborar con orgullo en el Plan Rector para el Uso, Manejo y Conservación de la Cuenca del Río Atoyac; en especial al Ingeniero Adrián Jiménez Varela.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por brindarme la oportunidad de aplicar la Ingeniería Ambiental participando en sus proyectos e iniciándome en mi vida profesional; en especial al Dr. Jorge Luis De Victorica Almeida.

A la Universidad Nacional Autónoma de
México, que es valuarte de la humanidad.

Y, a tí Señor que fuiste, eres y serás mi
roca fuerte.

CONTENIDO

- LISTA DE TABLAS
- LISTA DE FIGURAS
- LISTA DE GRÁFICAS
- RESUMEN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática en el Río Atoyac	4
1.2 Objetivo	6
1.3 Alcances	6
CAPÍTULO 2: RÍO ATOYAC	8
2.1 Descripción de la Cuenca	8
2.2 Poblaciones asentadas al margen del río	14
CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
3.1 Impacto de las descargas	16
3.2 Eutroficación	21
3.3 Autopurificación de un río	23
▪ Zona de degradación	
▪ Zona de descomposición	
▪ Zona de recuperación	
▪ Zona de agua limpia	

3.4	Demanda Bioquímica de Oxígeno	27
	▪ Descripción de la alimentación microbiana	
	▪ Cinética de las reacciones de degradación	
	▪ Método de los Momentos	
	▪ Método de Thomas	
	▪ Método de las diferencias logarítmicas	
3.5	Oxígeno Disuelto	35
	▪ Determinación del oxígeno disuelto	
3.6	Reaireación	38
37	Los Modelos Matemáticos en la Ingeniería Ambiental	40
3.8	Modelos de calidad de agua en ríos	47
	▪ Modelo de Streeter y Phelps	

CAPITULO 4: REGULACIONES AMBIENTALES54

4.1	Composición de los contaminantes en el agua	54
	▪ Compuestos orgánicos	
	▪ Contaminación nitrogenada	
	▪ Contaminación por temperatura	
	▪ Compuestos inorgánicos	
4.2	Consecuencias de la contaminación en la salud	59
4.3	Legislación Mexicana en materia de calidad del agua	61
	▪ Criterios Ecológicos de Calidad del Agua	

CAPÍTULO 5 : METODOLOGÍA71

5.1	Datos de los Muestreos	71
	▪ Ubicación y Descripción breve de las estaciones de muestreo	
	▪ Medición de caudales	
5.2	Datos de Laboratorio	81
	▪ Calidad del agua/Parámetros	
	▪ Determinación de la DBO	
5.3	Datos de Gabinete	83
	▪ Oxígeno disuelto de saturación	
	▪ Corrección por temperatura de las constantes	
	▪ Constantes de degradación	
	▪ Constantes de reaireación	
5.4	Datos de incorporación al modelo	90

CAPÍTULO 6: MODELO DE STREETER Y PHELPS92

- Interpretación de la curva de Streeter y Phelps
- Interpretación de la gráfica OD vs. X programada

CAPÍTULO 7: RESULTADOS96

- 7.1 Encuestas96
- 7.2 Aplicación del Modelo97
- 7.3 Evaluación99

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES103

- 8.1 Conclusiones103
- 8.2 Recomendaciones104

- BIBLIOGRAFÍA

- ANEXO 1: Mapas

- ANEXO 2: Memoria fotográfica

- ANEXO 3: Memorias de cálculo

- ANEXO 4: Tablas de calidad del agua del río Atoyac

- ANEXO 5: Listado del Programa en QBasic y Gráficas del programa

LISTA DE TABLAS

1. *Sistemas acuáticos saneados en México*
2. *Sistemas acuáticos contaminados en México*
3. *Número de habitantes en las poblaciones asentadas al margen del Río Atoyac*
4. *Constantes típicas de reaireación*
5. *Relación de Nomenclatura*
6. *Lineamientos de la Organización Mundial de la Salud en la calidad del agua para beber*
7. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua*
8. *Límites máximos permisibles para el agua de río de acuerdo a la NOM-001-ECOL-1996*
9. *Caudales y velocidades del río, en épocas de estiaje y lluvias*
10. *Datos de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno en el río, en época de lluvias*
11. *Datos de Oxígeno Disuelto y Demanda Bioquímica de Oxígeno en el río, en época de estiaje*
12. *Oxígeno disuelto de saturación calculado en las estaciones de muestreo*
13. *Constantes de degradación calculadas en época de lluvias*
14. *Constantes de degradación calculadas en época de estiaje*
15. *Constantes de reaireación calculadas en época de lluvias*
16. *Constantes de reaireación calculadas en época de estiaje*
17. *Datos de alimentación al programa para la época de lluvias*
18. *Datos de alimentación al programa para la época de estiaje*
19. *Localidades encuestadas*
20. *Puntos críticos en el río según la descarga*
21. *Valores iterados para la Demanda Bioquímica de Oxígeno como descarga única*

LISTA DE FIGURAS

1. Sección transversal irregular de una corriente descompuesta en áreas parciales
2. Eficiencia de remoción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

LISTA DE GRÁFICAS

1. Poblaciones asentadas al margen del Río Atoyac
2. Curva característica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno
3. Curva resultante de graficar Oxígeno Disuelto vs. Distancia
4. Curva de Streeter y Phelps programada

RESUMEN

El Río Atoyac es un cauce de la zona hidrológica no. 19 en el estado de Guerrero, que se ha deteriorado por captar descargas de aguas residuales municipales; el Instituto de Ecología Aplicada de Guerrero que propone el Plan Rector para el Uso, Manejo y Conservación de la Cuenca del Río Atoyac, se encargó de las diversas agravantes.

En este trabajo se encuentra la aplicación del modelo de "Streeter y Phelps" al Río Atoyac para contribuir con las estrategias del Plan Rector, procurando la protección, mejoramiento y conservación del agua.

Como resultado principal se conoce la capacidad de asimilación del río en épocas de estiaje y lluvias; estableciendo el punto crítico a lo largo del río, que representa la zona con mayor déficit de oxígeno por causa de la contaminación.

De tal modo que al reunir la información de campo, la legislación en materia ambiental y los fundamentos que sostienen el marco teórico se establece una alternativa para el Saneamiento.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Históricamente, los asentamientos humanos se han desarrollado en los márgenes de los ríos y arroyos, o cualquier otro tipo de cuerpo acuático con el fin de satisfacer sus necesidades más elementales.

La intervención del hombre en las cuencas generalmente acelera los procesos continuos de erosión, desertificación, salinización de los suelos, el agotamiento de los mantos freáticos, y la contaminación de ríos y embalses; disminuyendo con esto la capacidad de asimilación así como la pérdida de la biodiversidad (Hernández, 1990).

Posteriormente con la explosión demográfica, la demanda de agua potable ha aumentado considerablemente, y aún cuando México cuenta con suficientes volúmenes de agua para satisfacer las demandas de abastecimiento de todos los sectores, el creciente deterioro en la calidad del recurso hidráulico limita las posibilidades e incrementa sustancialmente el riesgo de afectar la salud pública y el ambiente; ya que en las aguas contaminadas los microorganismos encuentran un medio propicio para su desarrollo.

Aún cuando la mayor parte de nuestro planeta está constituido por agua, sólo una pequeña parte de ésta es agua dulce y no está distribuida uniformemente alrededor de la tierra. Hoy en día las grandes ciudades, demandan mayor cantidad de agua y al mismo tiempo generan una enorme cantidad de aguas residuales que están contaminando fuentes de abastecimiento, convencionales y no convencionales.

Debido a esto se han planteado metodologías de saneamiento para diversos cuerpos receptores que han sido afectados por corrientes contaminantes. En México, algunos ejemplos son los casos que se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. SISTEMAS ACUÁTICOS SANEADOS EN MÉXICO

Lugar	Sistema Acuático	Causa	Metodología de saneamiento.
Querétaro, Qro.	Presa y Río Jalpan	Descargas Municipales	Construcción de Plantas de Tratamiento
Naucalpan, Edo. de México.	Río Hondo	Descargas Municipales	Desazolve, construcción de fosas sépticas y colectores marginales a lo largo de 5 km.
Guadalajara, Jalisco.	Lago de Chapala	Descargas Municipales	Utilización de herbicidas para combatir el lirio
Jalisco	Playas de Puerto Vallarta	Agroquímicos	Normatividad de la industria Hotelera
San Luis Potosí	Cuenca baja del Río Pánuco	Descargas Municipales	Desinfección
Chiapas	Río Coatancito	Descargas Municipales	Drenaje

Fuente: CENAPRED

Lo es difícil observar que la causa principal de la contaminación en los sistemas acuáticos es el vertido de las aguas residuales en ellos, y aún cuando el agua está dotada de un poder utopurificante, éste no se ejerce sobre los residuos químicos característicos del siglo XX.

La práctica del vertido de residuos, se torna desastrosa tan pronto se rebasan los límites de la autodepuración del sistema; lo que conlleva a tener más sistemas acuáticos contaminados. En México algunos ejemplos son los que se presentan en la tabla 2.

TABLA 2. SISTEMAS ACUÁTICOS CONTAMINADOS EN MÉXICO

Ciudad y/o Estado	Sistema Acuático	Causas de Contaminación
Mazatlán, Sinaloa.	Estuarios del infiernillo y Urias	Descargas industriales y residuales
Santa Catarina, Querétaro.	Presa Santa Catarina	Detergentes y Cloro
Veracruz, Veracruz.	Río Blanco y Río Papaloapan	Descargas industriales
Cd. Juárez, Chihuahua.	Río Bravo	Descargas industriales y BPC (500 ppm)
Hidalgo	Presa Mamithí	Textil y Rastros
Tlaxcala	Presa Atlangatepec	Descargas industriales
Zihuatanejo	Bahía de Zihuatanejo	Descargas municipales
Cuernavaca, Morelos.	Lagunas de Tequesquitengo	Descargas municipales
Aguascalientes, Aguascalientes.	Presa Niágara y Cedazo	Descargas municipales
Jalisco	Río Santiago	Descargas industriales
Coatzacoalcos, Veracruz.	Estuario Monzapán	Descargas industriales
Veracruz, Veracruz.	Río Cotaxtla	Petroquímica e industria azucarera
Colima	Laguna de Coyutlán	PEMEX
Morelos	Ríos Yautepec, Apatlaco y Cuautla	Descargas industriales
Culiacán, Sinaloa.	Río Culiacán	Descargas industriales
Salina Cruz, Oaxaca.	Playa salinas del Marqués	PEMEX

Fuente: CENAPRED

Estos ejemplos son relevantes en nuestro país por las dimensiones de las corrientes contaminadas, por el tiempo que ha durado la problemática o simplemente por ser lugares altamente concurridos; esto no quiere decir que sean los únicos sistemas acuáticos que se encuentren ante el problema de la contaminación, y por lo tanto no son los únicos dignos de tomarse en cuenta.

En la actualidad se conoce de muchos ríos que presentan esta problemática, aunque no muy severa, por lo que los medios de difusión no lo han extendido; sin embargo para la biota de los ríos y las poblaciones cercanas esto es de suma importancia.

Entre estos se encuentra el Río Atoyac que es la corriente principal de una cuenca que comienza a verse afectada por descargas de aguas municipales. Son diversos los asentamientos que se encuentran a lo largo del río, pero los más pequeños tienen como fuente de abastecimiento directa el agua de este río. Es entonces cuando se debe establecer un programa de saneamiento que ayude a mitigar el problema, de lo contrario con el paso del tiempo los sistemas van adquiriendo renombre a causa de su deterioro y disminuyen las posibilidades para su recuperación.

1.1 PROBLEMÁTICA EN EL RÍO ATOYAC

El río Atoyac es un cauce que nace cerca de la población Pie de la Cuesta en el Estado de Guerrero, y efectúa un recorrido de aproximadamente 71.25 km antes de que se una al Océano Pacífico; el nombre que éste recibe se debe a la zona más numerosa asentada al margen del río, Atoyac de Álvarez, la cual es una comunidad que conforme crece y progresa afecta continuamente la calidad del agua del río, perjudicando a otras comunidades y ecosistemas.

En el Estado diversos factores han contribuido al agravamiento del problema del agua; la sobre-explotación de los acuíferos, la baja calidad del agua extraída, la desigualdad en la localización de las fuentes de abastecimiento en la entidad, y aunado a éstos el desperdicio del recurso por parte del usuario por carecer de una cultura para aprovecharlo eficientemente.

En todas las entidades, la demanda de agua se incrementa conforme al crecimiento poblacional; haciendo necesaria la búsqueda de más fuentes de abastecimiento, lo que significa la realización de diversas obras para su obtención, como lo son las perforaciones de nuevos pozos que requieren elevadas inversiones pues suelen tener incrustaciones salinas por su cercanía al mar y la obra en sí misma. Como otra alternativa se recurre al saneamiento de los ríos, haciéndose primordial cuando el agua de éstos son fuente de abastecimiento directa.

El bajo nivel de cobertura en los servicios de agua potable se refleja en aspectos de salud pública por lo que la política Hidráulica de México (Programa Hidráulico 1995-2000) establece como estrategias generales, entre otras, el saneamiento integral de cuencas, con acciones para el control de las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores, dando especial atención al uso y reuso de aguas tratadas con fines agrícolas, acuícolas, recreativos y turísticos. Actualmente se tienen 31 cuencas hidrológicas contaminadas en todo el territorio mexicano de las cuales 20 tienen serios problemas de eutroficación; lo cual indica el desequilibrio ecológico en el que se encuentran los cuerpos de agua y por ende la disminución en la producción de especies acuáticas comerciales, como causa de las condiciones adversas de su medio ambiente (CNA, 1993).

Aún con las diversas leyes que han sido promulgadas hasta la fecha, así como de los programas gubernamentales existentes, hoy en día los cuerpos acuáticos se siguen contaminando y la calidad del agua se sigue deteriorando en forma acelerada, aumentando con esto los riesgos a la salud.

Por tal motivo es necesario realizar un estudio integral para evaluar el grado de deterioro ambiental en los diferentes sistemas acuáticos y determinar las causas de contaminación en cada caso, para proponer alternativas que resuelvan el problema.

De aquí la importancia que se tuvo en la elaboración del "Plan Rector para el Uso, Manejo y Conservación de la Cuenca del Río Atoyac", presentando a continuación la aportación de este trabajo:

1.2 OBJETIVO

Establecer una estrategia de saneamiento para el Río Atoyac considerando la calidad que debería tener el agua del río según sus usos en la Normatividad Vigente.

1.3 ALCANCES

- Conocer la calidad del agua del Río Atoyac para evaluar su aporte como fuente de abastecimiento.
- Conocer la capacidad de asimilación del río en épocas de estiaje y lluvias, utilizando el modelo de Streeter y Phelps; para determinar si las condiciones del río son adecuadas para la preservación de la biota y para considerarse como fuente de abastecimiento.

- ✓ Programar el modelo de Streeter y Phelps para simplificar el trabajo del conocimiento de la capacidad de asimilación del río.

Cabe señalar que la estrategia de saneamiento que se presenta en este trabajo, sólo representa una propuesta específica para su evaluación por el Instituto de Ecología Aplicada de Guerrero.

CAPÍTULO 2. RÍO ATOYAC

En este capítulo se hace una descripción tanto de la cuenca que contiene al Río Atoyac como de la propia corriente de agua que compete a este trabajo.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

Dentro de la República Mexicana, el estado de Guerrero ocupa la 12ª posición basándose en la disponibilidad del recurso agua, siendo su aprovechamiento de 602,626 millones de m³.

De acuerdo con los usos específicos a escala nacional, el estado de Guerrero se ubica en el 11º lugar en el uso del agua para fines domésticos; la 16ª posición en el uso del agua para fines públicos; mientras que en el pecuario ocupa el último junto con otras entidades; el 9º puesto en lo agrícola; el 15º en la industria y el 2º en las hidroeléctricas (INEGI, 1996). Para un mejor estudio de los recursos hídricos de la República Mexicana, la SARH dividió el país en regiones hidrológicas; estas regiones comprenden una o más corrientes de agua importantes o cierta superficie costera de interés (SEPLAP, 1995).

En el Estado de Guerrero se encuentran tres regiones hidrológicas, que son las número 18, 19 y 20. Las regiones se dividen en cuencas, que son superficies drenadas por una corriente principal y sus influentes.

- UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Río Atoyac se encuentra dentro de la región hidrológica no.19, que abarca la región de la Costa Grande del estado de Guerrero¹.

Está geográficamente ubicada entre los paralelos 17° 08' Latitud Norte y 17° 33' Longitud Oeste, y los meridianos 100° 08' Latitud Norte y 100° 33' Longitud Oeste; teniendo una extensión territorial de 849 km².

- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre tal que si fuera impermeable, todas las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por un sistema de corriente hacia un mismo punto de salida. La cuenca es de tipo exorréico, la corriente principal que la recorre es el río Atoyac que cuenta con pendientes fuertes del orden del 10 al 59%, en época de lluvias aporta volúmenes superficiales de considerable magnitud (1,070 m³/seg). El río se origina en la parte montañosa de la Sierra Madre del Sur con altitud de 2500 msnm., los límites de la cuenca son: al norte con el río del Balsas, al este con el río Coyuca, al oeste con la cuenca del río Tecpan, y al sur con el Océano Pacífico.

El Río en su trayectoria de Norte a Sur, es alimentado por varias corrientes de tipo intermitente, como el río Pie de la Cuesta, La Cueva, el Río Bálsamo y Las Delicias que llega hasta el embalse de la presa y desemboca en el Océano Pacífico. El río atraviesa los poblados de Atoyac de Álvarez, San Jerónimo de Juárez, Arenal de Gómez, Arenal del Centro, Arenal de Álvarez y Hacienda de Cabañas.

¹ En el Anexo 1 se localiza el mapa de ubicación de la Cuenca del Río Atoyac

El porcentaje territorial del municipio de Atoyac de Álvarez representa el 2.25% de la superficie del Estado y cuenta con la población más numerosa de las comunidades que están asentadas al margen del río.

- OROGRAFÍA

Las montañas y lomerios que circundan la cuenca, hacen drenar sus influentes concentrándose en el río formando una sola corriente que desemboca en la Barra de San Jerónimo y esta a su vez en el Océano Pacífico.

Las principales elevaciones montañosas son:

Elevación:	Altura Aproximada:
	msnm
cerro pelón	3100
cerro de piedra	3100
cerro de venado	2900
cerro plateado	2820
cerro guacamayo	2000
cerro piloncillos	1960
cerro grande	1520
cerro el fortín	1420

- GEOLOGÍA

Geológicamente la cuenca del río Atoyac se encuentra al margen de la Sierra Madre del Sur que se origina a fines del cretácico superior formado por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas de edad paleozoica a terciaria.

Las rocas más antiguas están representadas por las metamórficas, estas rocas se encuentran distribuidas principalmente en los alrededores de la planicie constituyendo lomeríos y cerros.

Esta unidad litológica presenta mediana alteración y fracturamiento superficial abundante, con escasa permeabilidad secundaria susceptible de permitir infiltración del agua de lluvia.

Las rocas intrusivas, formadas principalmente por granito se consideran como una unidad impermeable funcionando como una barra al flujo de agua.

- CLIMA

En la región predomina el clima subhúmedo con lluvias en verano, de acuerdo a Thorthawite la clasifica como CWAA provincia de humedad C subhúmedo.

El mes más cálido corresponde a mayo, con temperaturas alrededor de 27.43°C, en tanto que el mes más frío es enero con temperaturas de 25.73°C. Con esto se aprecia que la oscilación térmica es baja, tiene valor de 1.7°C; pero en general, el comportamiento de la temperatura media anual es alta en todo el año, aún en los meses que pertenecen a la temporada de invierno.

- TOPOGRAFÍA

La topografía de esta cuenca es muy irregular y accidentada en las partes altas, ya que nace en la parte montañosa de la Sierra Madre del Sur con altitudes de hasta 3100 msnm. Contrastando con una parte plana que corresponde a la faja costera, con anchos variables que van desde unos cuantos metros hasta aproximadamente 30 km.

- VEGETACIÓN

La vegetación es considerada uno de los puntos importantes de la cuenca, ya que controla en gran parte la acción y el movimiento del agua, intersección, infiltración, almacenamiento, evaporación y erosión.

Actualmente se presenta una vegetación escasa de selva baja, caducifolias y pinaceas; que sólo es posible encontrar en las partes intermedias y altas de la línea divisoria de las aguas.

Por su extensión las coníferas ocupan 33%, las latifoliadas el 42% y los pastos el 25% de la superficie total de la cuenca; tendiendo ésta a reducirse por la tala irracional e incontrolada, incendios forestales y en particular por mal uso del suelo en las tierras de cultivo. Generalmente en zonas altas de relieve uniforme o irregular donde las condiciones ecológicas locales son más aptas, el desarrollo natural de bosques y selvas maderables presenta las especies características de la cuenca:

Dentro de la zona de planicie de la cuenca se presentan grandes extensiones de huertas de cocotero, beneficiando esto en gran parte la conservación del suelo de esta zona.

- SUELO

Se compone por aluviales que se localizan en la parte baja de la cuenca y en los cauces de los arroyos que la conforman, procedentes de las diferentes rocas que componen las estribaciones de la Sierra Madre del Sur, entre las que destacan rocas como calizas dolomitizadas, lutitas, limonitas, areniscas, conglomerados y principalmente tobas.

PRECIPITACIÓN

La precipitación es muy regular durante el año, el más húmedo es septiembre con 319.88 mm y el más seco es abril con 0.73 mm. En la mitad del año se observa un ascenso en la precipitación entre los meses de mayo a septiembre con 112.35 mm a 319.88 mm respectivamente.

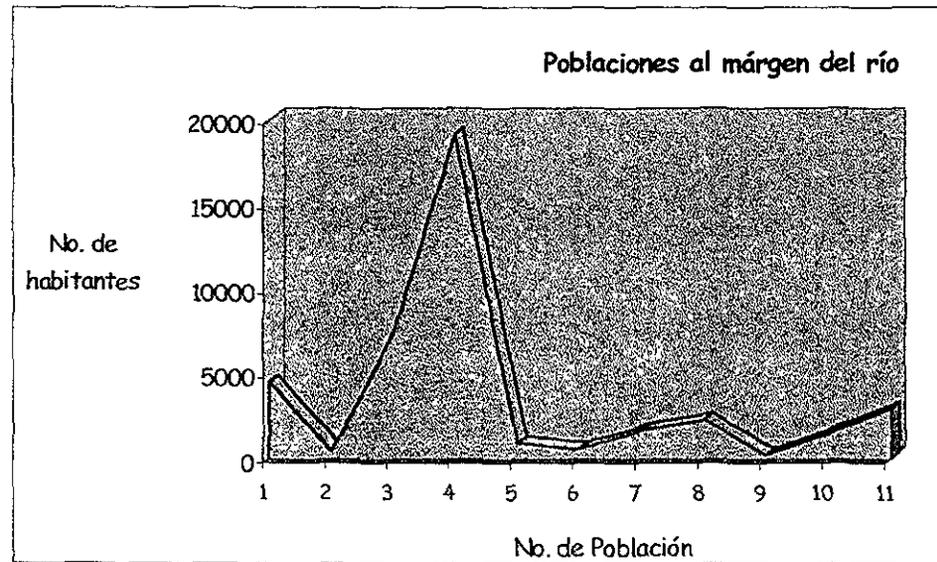
En estos meses se precipita el 88.4% de la lluvia que cae en un año y esto se debe a la influencia de los ciclones tropicales que se originan en el mar de las Antillas y el Océano Pacífico, siendo éstos más frecuentes en septiembre, afectando las condiciones climáticas del país ya que muchas de sus trayectorias corren paralelas a la costa o se internan en el continente.

2.2 POBLACIONES ASENTADAS AL MÁRGEN DEL RÍO

De las entidades federativas que conforman el Estado de Guerrero, la Cuenca se encuentra en los municipios de Atoyac de Álvarez y Benito Juárez.

Son diversas las comunidades que están ubicadas en estos 2 municipios, pero las más representativas por su número de habitantes son Atoyac de Álvarez y San Jerónimo; teniendo la segunda menos de la mitad de pobladores que la primera (ver gráfica 1).

GRÁFICA 1. POBLACIONES ASENTADAS AL MÁRGEN DEL RÍO ATOYAC



Fuente: INEGI (Diciembre de 1997).

En la gráfica 1, las poblaciones se numeraron como se indica en la Tabla 3.

TABLA 3. NÚMERO DE HABITANTES EN LAS POBLACIONES ASENTADAS AL MÁRGEN DEL RÍO

Nombre del Poblado y Número asignado en la gráfica 1	No. de habitantes
1. El Paraíso	4499
2. Mexcaltepec	396
3. San Jerónimo	7322
4. Atoyac de Álvarez	19154
5. San Juan de las Flores	883
6. Los Valles	550
7. Corral Falso	1641
8. Hda. de Cabañas	2235
9. Los Órganos	181
10. Las Tunas	1490
11. El Ticui	2975

Cabe señalar que éstas once poblaciones se enlistan con base en la apreciación del "Mapa de Aguas Superficiales de la Cuenca del Río Atoyac, Gro." ²

De las poblaciones mencionadas, la primera que se encuentra en el recorrido del río es El Paraíso y la última es Hacienda de Cabañas, pero la más importante es Atoyac de Álvarez.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo contiene la información necesaria que sustenta la realización de este trabajo.

3.1 IMPACTO DE LAS DESCARGAS

Los contaminantes en el agua provienen fundamentalmente de las descargas de aguas residuales municipales e industriales. La cantidad de aguas residuales que se producen varía de acuerdo con la población y las actividades que lleven al cabo.

Las aguas residuales municipales desde el punto de vista de su origen, son aquellas que resultan de la combinación de la actividad de un núcleo urbano y de los líquidos arrastrados por el agua de lluvia. Las aguas residuales que se generan por la actividad del hombre, provienen del uso doméstico de las casas habitación, edificios comerciales e instituciones; junto con las provenientes de los diversos establecimientos. Casi todos estos desechos contienen heces fecales, grasas, aceites, jabones y detergentes sintéticos. Las lluvias que caen sobre la ciudad arrastran partículas de polvo, ladrillo, cemento e hidrocarburos de la vía pública, así como excretas de animales callejeros que se mezclan y se disuelven con el agua. Estos escurrimientos pluviales van hacia el alcantarillado, donde se colectan los desechos propios de cada comunidad aumentando así considerablemente el volumen de aguas residuales.

Por otra parte, de acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías: (1) aguas superficiales, (2) aguas subterráneas y (3) aguas meteorológicas. Las aguas superficiales comprenden los ríos, arroyos, océanos, lagos y aguas embalsadas. Los cauces de agua sometidos a contaminación presentan una calidad variable a lo largo de su trayectoria, a diferencia de las aguas subterráneas que presentan una calidad relativamente uniforme. (Ramalho 1991)

Los ríos han sido usados como la principal vereda de las aguas residuales domésticas, industriales y de la agricultura. Es bien conocido que los ríos poseen diversas formas de asimilar o dirigir el agua residual:

- (a) Conduciendo el agua residual hacia el mar.
- (b) Mezclándola rápidamente, se diluye y dispersa.
- (c) Con sedimentación lenta.
- (d) En condiciones turbulentas se conduce con rapidez y ocurre una reaireación que degrada la materia orgánica.

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, ocurren cambios indeseables en la flora y fauna, el impacto que produce la contaminación por la descarga de aguas residuales en un río, afecta directamente la calidad del agua y biota del mismo, resultando un decremento en la concentración del oxígeno disuelto (OD) principalmente. La disminución del oxígeno disuelto es una de las más comunes alteraciones del medio ambiente que dañan la vida acuática, y un escenario contaminado enfatiza la necesidad de combatirlo. No existen dos ríos que sean siempre exactamente iguales; en su individualismo, las corrientes difieren entre sí en los detalles de respuesta a la indignidad de la contaminación.

El efecto de la contaminación de las aguas sobre el medio ambiente y la biota, fue estudiado desde los años 60's, y se encontró que la disminución del oxígeno disuelto y la formación de depósitos de lodos pueden considerarse como la perturbación ambiental más importante que puede afectar al medio acuático.

El oxígeno disuelto disminuye debido a su utilización por la oxidación de materias orgánicas que llegan con las aguas residuales, aún cuando existe incremento en oxígeno por aireación natural; si no hay factores que contribuyan a la aportación de oxígeno al agua, comenzará la descomposición activa, presentando diversas poblaciones como lo pueden ser las coliformes, ciliados, rotíferos y crustáceos; ya que las especies vivas que necesitan un alto grado de oxígeno disuelto, se asfixian o tratan de desplazarse hacia otras áreas o tramos de río donde los recursos en oxígeno disuelto sean superiores.

En cualquier tramo seleccionado del curso del agua, hay una variación en la concentración de oxígeno disuelto que depende de la hora del día. Las algas y otras plantas dan oxígeno al agua a través del proceso de fotosíntesis. Esta cantidad de oxígeno puede ser tan considerable que el agua pueda llegar a estar sobresaturada en algunos momentos por el período diurno. Además de dar oxígeno, el proceso de fotosíntesis consiste en producir hidratos de carbono que sirvan como base y soporte para toda la vida acuática. Esto corresponde a la reacción que señala la ecuación 1:



Mientras la fotosíntesis ocurre, hay también respiración; que continúa durante las 24 horas del día sin tener en cuenta la iluminación. Durante esta respiración se consume oxígeno y se produce CO_2 .

El crecimiento acelerado de bacterias es una respuesta a suministros ricos en nutrientes de las aguas residuales domésticas. Durante el período de rápida asimilación de nutrientes, la reproducción bacteriana alcanza su óptimo y la utilización del oxígeno disuelto es aproximadamente proporcional a la cantidad de materia orgánica o de alimento utilizado.

El nitrógeno y el fósforo presentes en las proteínas de las aguas residuales dan lugar a problemas especiales en los cauces receptores.

La alta concentración de estos elementos en el agua crea condiciones especialmente favorables para el desarrollo de las plantas verdes. Si el agua es de curso libre se forman unos recubrimientos verdes aterciopelados sobre las piedras y en las partes laterales de los arroyos se forman a veces hilos conocidos como cabellos de sirena. Esta vegetación consiste de una jungla en miniatura, en la cual se establece una vida animal de muchos tipos; de manera que en su mayoría son base para la alimentación de los peces. Si, por el contrario, el agua está quieta (por ejemplo los pantanos), se estimula el crecimiento de tipos de algas no deseados. Estas algas hacen que el agua aparezca con un color verdoso. Todo esto ocurre por la descomposición de materiales orgánicos y compuestos nitrogenados (Ramalho 1991).

Cuando un agua residual es descargada, en el punto de vertido el espesor del lodo es el máximo y se va reduciendo gradualmente al ser descompuesta por la acción de organismos hasta que resulte insignificante; más cuando existen diversos puntos de descarga a lo largo del río, el espesor del lodo no disminuye, sino que se hace uniforme en la profundidad del agua del río. También en el punto de vertido hay turbidez bastante elevada debido a que se presentan sólidos en suspensión; pero a medida que los sólidos se van sedimentando el agua se va haciendo cada vez más clara, aunque las partículas pasan a formar parte de lodo que está en el fondo.

Poco después de la descarga del agua residual se alcanza el máximo crecimiento de mohos asociados con bacterias filamentosas y se asocian con la deposición de lodos. La gran turbidez no produce algas, las únicas que pueden crecer son las llamadas azul-verdosas, características de aguas contaminadas, éstas pueden cubrir las piedras de los márgenes haciéndolas resbaladizas y dan olores desagradables en su descomposición estacional. El plancton, así como otras formas flotantes que se van generando por todos estos factores, constituyen un suministro importante de especies no deseadas para la fauna acuática.

Después de combinarse el agua residual con el agua dulce, las bacterias se reproducen y llegan a ser abundantes alimentándose de la materia orgánica del vertido. Los protozoociliados, inicialmente pocos en número se alimentan de las bacterias. La población de bacterias va disminuyendo gradualmente, tanto por un proceso natural de mortandad como por servir de alimentación a los protozoos. Después de discurrir por el cruce se va formando un grupo dominante de zooplancton. Al transcurrir alrededor de los siete días, los ciliados pasan a ser víctimas de los rotíferos y los crustáceos pasan a ser las especies dominantes. De esta forma el proceso biológico de degradación y consumo de las aguas residuales depende de una sucesión interrelacionada de especies de zooplancton, tales que una especie vive y captura otras.

Esta relación entre las bacterias y sus predadores es la que se encuentra en la operación de una moderna planta de tratamiento de aguas residuales (Ramalho 1991).

Sin embargo, todas las alteraciones que se presentan en la biota del río afectan directamente a las comunidades asentadas en los alrededores del mismo, pues deja de tener fines pesqueros, recreativos y aún de esparcimiento.

El suministro a las poblaciones deja de ser directo y le debe preceder un tratamiento antes de que esté en manos de los destinatarios. De no llevarse a cabo todos los procedimientos, la salud se ve afectada por la calidad del agua de consumo.

En otro aspecto sin relevancia para el objetivo de este trabajo, pero que no deja de ser importante; es el desagrado que nos causa ver una corriente contaminada, ya que los hombres siempre se inclinarán por lugares limpios y paisajes hermosos: aún cuando ellos mismos son los causantes de los deterioros.

3.2 EUTROFICACIÓN

La contaminación de una corriente estimulada por el exceso de nutrientes inorgánicos se conoce como eutroficación. Los organismos encargados de realizar el crecimiento de la flora acuática son principalmente las algas. A éstas se les puede considerar como plantas microscópicas que utilizan la energía de la luz para sintetizar materias orgánicas complejas a partir de anhídrido carbónico, agua y algunos otros materiales. El crecimiento de las algas tiende a estar controlado por la disponibilidad de los compuestos con nitrógeno y fósforo.

Es por esto que cuando están presentes en una corriente concentraciones extraordinariamente grandes de nitratos (NO_3^{2-}) o fosfatos (PO_4^{2-}), aparece el crecimiento acelerado de algas; este crecimiento produce una capa verde antiestética sobre la superficie acuática y disminuye la posibilidad de incorporación del oxígeno atmosférico al agua.

Todos los organismos vivos requieren compuestos con nitrógeno y fósforo, de esta manera en el crecimiento microbiano asimila el fósforo en forma de fosfatos y el nitrógeno como nitratos, ó como amoníaco; por el contrario la mayoría de las bacterias asimilan el nitrógeno en forma de amoníaco y sólo unas cuantas lo asimilan como nitratos. Es importante el uso de la palabra asimilar, debido a que algunas bacterias pueden utilizar los nitratos como fuente de oxígeno en condiciones anóxicas, liberando nitrógeno (Winkler, 1994).

El fósforo, se encuentra en el agua como materia orgánica o como productos totalmente oxidados como los ortofosfatos, y en ese caso la acción de los microorganismos aerobios puede transformar la materia orgánica fosfatada en fosfatos. En ausencia de oxígeno los fosfatos pueden ser reducidos a fosfitos y a hipofosfitos (Hernández, 1982).

Podemos considerar a la eutroficación como sinónimo de un ecosistema desbalanceado en donde existe un crecimiento excesivo de organismos fotosintéticos, como dichos organismos producen oxígeno y en este caso la disponibilidad del oxígeno es la clave para abatir la contaminación orgánica, puede que no resulte obvio el porqué la eutroficación es indeseable, para explicar esto se deben hacer dos aclaraciones.

En primer lugar, la fotosíntesis implica la creación de materia orgánica a partir de materiales inorgánicos. Cuando los organismos fotosintéticos mueren, sus componentes se convierten en nutrientes orgánicos, que ejercen una demanda de oxígeno para la corriente acuática.

En segundo lugar, en ausencia de luz, muchos tipos de algas usan el oxígeno para obtener energía de la descomposición oxidativa de compuestos orgánicos previamente fotosintetizados, debido a que las algas tienen la capacidad de almacenar energía luminosa en la forma de energía química para usarla en ausencia de la luz.

Así que, mientras un fuerte crecimiento de algas puede producir sobresaturación de una corriente de agua durante el día, puede causar desoxigenación durante la noche. Cuando se produce una cubierta algacea muy gruesa, es posible que la luz no penetre hasta los estratos inferiores de la cubierta, de manera que aún de día, las algas en los niveles inferiores utilizan el oxígeno.

Las masas algaceas depositadas en los márgenes de los ríos, mueren y se pudren, produciendo condiciones anaerobias, representando un peligro para la salud, pues los desperdicios de las comunidades, los fosfatos de los detergentes y el nitrógeno en los residuos humanos, estimula el crecimiento algaceo; más cuando las masas de algas se pudren y se acumulan en el borde del agua, se crea un ambiente donde bacterias peligrosas proliferan. Los pájaros que se alimentan de las algas mueren también por el efecto tóxico y las corrientes dejan de ser atractivas (Winkler, 1994).

3.3 AUTOPURIFICACIÓN DE UN RÍO

La autpurificación es también conocida como "capacidad de asimilación"; esto es, que tanto puede degradar una corriente de agua la materia orgánica de manera natural. Una corriente natural sana, como pueden ser lagos y ríos, posee una capacidad limitada para asimilar los componentes vertidos con los desechos, cuando esta capacidad se agota la corriente se contamina.

La capacidad de autpurificación se debe a cantidades relativamente pequeñas de microorganismos presentes en el agua (Winkler, 1994).

Dichos microorganismos se alimentan de sólidos orgánicos produciendo desechos que pueden destruirlos y que al mismo tiempo sirven como alimento para otro tipo de microorganismos que los suceden, los cuales continúan el proceso de descomposición hasta que los sólidos orgánicos quedan reducidos a sales inorgánicas estables como son los nitratos (NO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y fosfatos (PO_4^{2-}). Estos sirven a su vez de alimento a otras formas biológicas de vida como son las algas, que durante su proceso de desarrollo y metabolismo producen oxígeno como producto de desecho. Entonces éste se disuelve en el agua agregándose al que se obtiene por la reaireación; estas reacciones hacen que el agua vuelva a su condición de "limpieza" y pueda considerarse sano. Todo esto depende del tiempo, de la temperatura, del abastecimiento de oxígeno y de otros factores ambientales que regulan los desarrollos biológicos.

La autopurificación de una corriente tiene lugar en cuatro etapas, dividiéndose la corriente en cuatro zonas sin delimitación definida; éstas se conocen como zonas de degradación, de descomposición, de recuperación y de agua limpia (Manual de Tratamiento de Aguas Negras, 1994).

- ZONA DE DEGRADACIÓN

La primera de estas zonas es la de degradación que se encuentra justo debajo del punto de contaminación. Esta zona se caracteriza por presentar sólidos flotantes, como fragmentos de basuras, astillas, papel y algunas veces sólidos fecales. La turbiedad de una corriente aumenta sensiblemente por las descargas y aunque el oxígeno disminuye no se agota de inmediato. La fauna acuática disminuye y queda limitada a aquellas especies capaces de sobrevivir en el agua que contiene poco oxígeno disuelto.

Las bacterias se presentan en grandes cantidades, incluyendo las patógenas que estaban en las aguas negras. Los hongos también se presentan y con el tiempo se van encontrando grandes crecimientos filamentosos de éstos adheridos a las rocas.

Organismos típicos que se encuentran en esta zona:

(Hernández, 1990)

- ♦ Desaparición de peces y algas verdes.
- ♦ Algas verdes y azules adheridas a las piedras mojadas.
- ♦ En el fango encontramos gusanos parecidos a las lombrices de tierra.
- ♦ Hongos blancos, verde oliva, pardos y rojizos.
- ♦ Protozoarios
- ♦ Posible existencia de peces que necesitan poco oxígeno y se alimentan de materia orgánica.

A medida que se va agotando la reserva de oxígeno disuelto, la zona de degradación se convierte en la zona de descomposición, en donde se inicia una descomposición anaerobia o putrefacción. Cuando la contaminación es intensa, esto ocurre rápidamente, de lo contrario la aparición de la segunda zona es más lenta.

• ZONA DE DESCOMPOSICIÓN

Esta zona se caracteriza por el desarrollo de la descomposición anaerobia. Aquí el oxígeno desaparece, el color del agua es grisácea y pueden darse condiciones sépticas en las que no viven peces aún cuando los organismos de descomposición orgánica trabajan activamente.

Pueden desprenderse gases como metano (CH_4), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), y ácido sulfhídrico (H_2S) entre otros, que son los causantes del mal olor aunado a la formación de espuma en la superficie. Al ir progresando la descomposición de la materia orgánica, disminuye la cantidad de sólidos putrescibles y empiezan a disminuir de intensidad las reacciones de putrefacción.

El oxígeno de reaireación iguala primero y excede después al que se va necesitando para la descomposición bioquímica de manera que al final de esta zona hay algo de oxígeno disuelto, originándose así la tercera etapa.

Organismos típicos que se encuentran en esta zona:

(Hernández, 1990)

- ♦ Crecimiento de la flora bacteriana.
- ♦ Disminución primero y reaparición después de los protozoarios.
- ♦ Desaparición de los hongos en condiciones sépticas y reaparición posterior de organismos filamentosos.
- ♦ Existencia de larvas, moscas y gusanos.

- ZONA DE RECUPERACION

En esta zona aparece el oxígeno en cantidades gradualmente mayores, los sólidos orgánicos disminuyen y la corriente se torna favorable; siguen existiendo microorganismos pero en menor concentración y se han extinguido las especies anaerobias, quedando solamente las especies aerobias. Los peces pueden sobrevivir nuevamente y aparecen otras formas superiores de organismos.

Organismos típicos que se encuentran en esta zona:

(Hernández, 1990)

- ◆ Aparición de protozoarios, rotíferos y crustáceos.
 - ◆ Aparición de algas.
 - ◆ Existencia en el fango del fondo, de caracoles y larvas de insectos.
 - ◆ Existencia de peces resistentes, especialmente las carpas.
-
- ZONA DE AGUA LIMPIA

En esta etapa se restauran las condiciones de la corriente natural y el oxígeno disuelto está cerca de la saturación. Las condiciones normales se caracterizan por la presencia de peces para la pesca, quedando las bacterias patógenas y parte de los compuestos metálicos pues no se eliminan por los procesos bioquímicos existentes.

El tiempo que se requiere para la autpurificación de una corriente, o la distancia que tiene que recorrer para atravesar por las cuatro zonas, depende de la fuerza y volumen relativos de la contaminación, del caudal de la corriente, de la turbulencia del flujo, de la temperatura del agua y principalmente de si se descarga o no una corriente contaminante adicional durante el proceso de la autpurificación (Manual de Tratamiento de Aguas Negras, 1994).

3.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica biodegradable presente en una muestra de aguas residuales (Ramalho 1991).

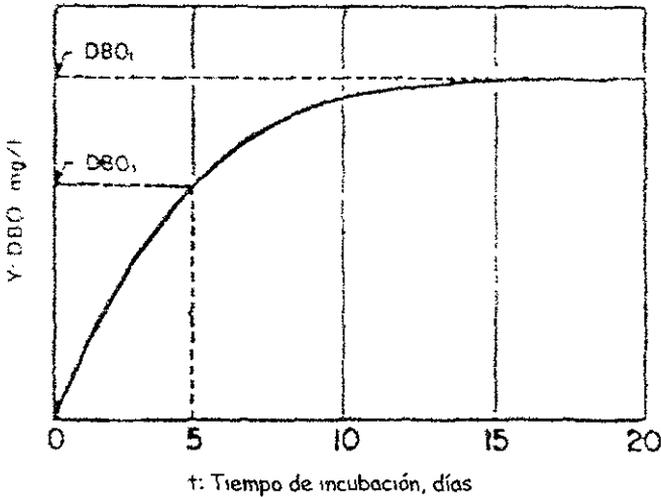
Se puede decir que la DBO es una prueba analítica o un ensayo de diluciones de la muestra que será analizada, donde una población microbiana tiene como alimento la materia orgánica presente en un desecho, llevándola hasta su oxidación completa; es decir dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y amoníaco (NH_3).

Teóricamente se requiere de un tiempo infinito para la oxidación biológica completa de la materia orgánica; en general y para fines prácticos a los 20 días de incubación la reacción se considera completa; sin embargo en la mayoría de los casos 20 días representa mucho tiempo para esperar los resultados. Mediante cuantiosos experimentos realizados con anterioridad, se ha encontrado que entre el 70 y 80% del total del la DBO se logra a los 5 días de incubación y ésta se aceptó como estándar para la realización de las pruebas, denominando al período de 21 días de incubación como la DBO última. La curva representativa de este fenómeno se aprecia en el gráfico 2.

- DESCRIPCIÓN DE LA ALIMENTACIÓN MICROBIANA

Para describir la degradación de la materia orgánica en forma más específica es necesario remontarse a las operaciones metabólicas, que son un conjunto de reacciones bioquímicas que los seres vivos realizan para mantenerse vivos y para poder reproducirse.

GRÁFICO 2: CURVA CARACTERÍSTICA DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO



El metabolismo se divide en catabolismo; que son las transformaciones para que la célula obtenga energía y material para la reproducción, y anabolismo; que es cuando las propiedades catabólicas son suficientes para que la célula viva se reproduzca. De ahí que los microorganismos se puedan clasificar según su fuente de energía; esto es los que obtienen energía de la luz, llamados fotótrofos y los que obtienen energía de la ruptura de uniones químicas, conocidos como quimiótrofos. Todas las plantas verdes son ejemplo de los que se nutren a través de la luz y los hongos, bacterias y protozoarios entre otros son consecuencia de ruptura.

Existe otra clasificación de los microorganismos según su fuente de protones; éstos son:

- ♦ Litótrofos, que utilizan protones de uniones inorgánicas (plantas verdes);
- ♦ Organótrofos, que utilizan protones de uniones orgánicas;

- ♦ Autótrofos, que obtienen carbono de compuestos inorgánicos y
- ♦ Heterótrofos, que obtienen carbono de moléculas orgánicas.

Con base en esta clasificación, a las bacterias y protozoarios se ha denominado "Quimiorganoheterótrofos" (QOH); tres grupos principales que sirven de alimento para los organismos QOH son las proteínas, los polisacáridos o carbohidratos y los lípidos que contienen grupos carboxilos ($R-COO^- H^+$) para que se lleve al cabo el ciclo del ácido tricarboxílico.

Cuando se habla de la fuente de protones realmente se requiere la energía de los electrones asociados al protón para que los protones sean desechados en moléculas de agua, siendo el oxígeno el activador de la generación de enzimas de la fosforilación oxidativa; esta es cuando la célula se alimenta a través de su membrana celular, entonces las moléculas tienen un tamaño tal para que puedan difundirse por la pared celular.

La célula se acerca al alimento y luego genera enzimas que hidrolizan para reducir el tamaño de las moléculas y puedan pasar a través de la membrana; ya rotas las moléculas e hidrolizadas pasan por difusión o transporte activo a través de la membrana; en cuanto la molécula entra, tiene que degradarse rápidamente para tener mayor concentración fuera de la célula que dentro. La célula se alimenta generalmente por los centros activos teniendo productos de desecho (Mendoza 1998).

Cuando un nutriente entra a una corriente éste es degradado por los microorganismos existentes que consumen el oxígeno disuelto al efectuar la descomposición, de manera que se puede afirmar que dicho nutriente ejerce una demanda sobre la disponibilidad de oxígeno disuelto.

Mientras más oxígeno se requiera para la descomposición de un nutriente, más probable será que se agote el oxígeno de la corriente de agua. Lo anterior indica que la demanda de oxígeno ejercida por una sustancia, es una medida de su poder de contaminación (Winkler, 1994).

• CINÉTICA DE LAS REACCIONES DE DEGRADACIÓN

La cinética química estudia la rapidez en que se efectúan las reacciones químicas. El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan un residuo específico; las enzimas tienen la capacidad de transformar moléculas siendo la mayor parte de ellas catalizadores.

Se identifican principalmente tres tipos de reacciones químicas:

- ◆ Orden cero
- ◆ Orden uno
- ◆ Orden dos

Para representar la curva DBO por medio de un modelo matemático con base a las consideraciones de cinética de reacción, surge un modelo que representa el grado de utilización de oxígeno que corresponde a una reacción de primer orden, pues la concentración de materia orgánica que permanece sin oxidar va haciéndose cada vez menor.

En términos matemáticos esto es que la velocidad de utilización del oxígeno, dada por la tangente a la curva en un punto determinado del tiempo de incubación, disminuye en la medida en que la concentración de materia orgánica que permanece sin oxidar va disminuyendo, teniendo en cuenta que hay una proporcionalidad entre el grado de utilización de oxígeno y la destrucción de la materia orgánica por oxidación biológica. La ecuación que describe esta evolución queda representada en la ecuación 2.

$$dL / dt = -K_1 L \dots(2)$$

Donde "L" es la concentración de la materia orgánica expresada en mg/L en un tiempo "t", y "K₁" es una constante de degradación biológica expresada en días⁻¹. El término dL/dt, señala la velocidad de desaparición de la materia orgánica por oxidación biológica aerobia, sabiendo que esto no podrá ser nunca menor a cero (Ramalho, 1991).

Para resolver la ecuación diferencial, es necesario separar variables e integrar desde el tiempo cero, que corresponde a la concentración inicial de materia orgánica (L₀) y el tiempo t que corresponde a la concentración "L", haciendo el cambio de logaritmos naturales a decimales, asumiendo "K₁ / 2.303 = K" y considerando y la materia orgánica oxidada hasta el tiempo "t" se llega a la siguiente expresión que es el modelo matemático de la curva de la DBO:

$$y = L_0 (1 - 10^{-Kt}) \dots(3)$$

De aquí que para aplicar la ecuación 3 sea necesario conocer los parámetros "K" y "L₀", además de disponer de una serie de datos de DBO con sus tiempos respectivos.

Existen diferentes métodos para calcular los parámetros "K" y "L₀". entre éstos tres de ellos recomendados por Eckenfelder que son.

1. Método de las diferencias logarítmicas.
2. Método de los momentos.
3. Método gráfico de Thomas.

(Ramalho, 1991)

- MÉTODO DE LAS DIFERENCIAS LOGARÍTMICAS

Este método está basado en la siguiente expresión:

$$\log r = 0 \log (2.303 L_0 K) - Kt \dots(4)$$

La ecuación 4 indica que "K" y "L₀" pueden obtenerse a partir de un gráfico semilogarítmico de "r" en función de "t". Para ello es necesario dibujar "y" (utilización de oxígeno) en función de "t" en un papel de coordenadas cartesianas y trazar la curva que mejor se adapte; llevar a un gráfico en papel semilogarítmico, las variaciones diarias, $\Delta y / \Delta t$ con respecto al tiempo. Los intervalos de tiempos de tiempo se toman normalmente en días de tal forma que $\Delta t = 1$. Los valores de los incrementos se llevan al gráfico suponiendo que el valor en tiempo que les corresponde está en medio de cada intervalo, por ejemplo: el valor de Δy correspondiente al intervalo 0-1 se coloca en la abscisa $t = 0.5$; con base en lo anterior se debe realizar un ajuste lineal que permita calcular K, que es la pendiente de la recta con signo negativo; y L₀ se calculará como la intersección entre 2.303 por K ($I / 2.303 K$).

- MÉTODO DE LOS MOMENTOS

Este método es un aplicación muy simple una vez que se tengan los diagramas $\Sigma y / L_0$ y $\Sigma y / \Sigma t y$ en función de K para la secuencia diaria de medidas de DBO.

A partir de ese momento las ecuaciones se derivan de establecer los diagramas de Moore para cualquier secuencia diaria de medidas de DBO. La aplicación de los diagramas de Moore para el cálculo de K y L_0 se aprecian en la literatura por la visualización de las ecuaciones.

- MÉTODO DE THOMAS

Este es un método aproximado que ha sido justificado, ya que la precisión de resultados experimentales no suele ser muy alta. El método se basa en la similitud de las siguientes funciones:

$$(1 - 10^{-Kt}) \dots (5) \text{ y } 2.3 Kt [1 + (2.3 / 6) Kt]^{-3} \dots (6)$$

Esta similitud se muestra en los desarrollos en serie de las mismas funciones y la comparación de los segundos miembros de las ecuaciones pone de manifiesto que los primeros tres términos de las dos series son idénticos y que la diferencia entre los cuatro términos es muy baja. Al sustituir las funciones entre paréntesis en la expresión matemática de la DBO, por su aproximación dada en la ecuación se obtiene la ecuación 7.

$$y = L_0 (2.3 Kt) [1 + (2.3 / 6) Kt]^{-3} \dots (7)$$

De la cual, tomando el inverso y ordenando los términos, obtenemos la ecuación 8.

$$t / y = [1 + (2.3 / 6) Kt]^{-3} / 2.3 K L_0 \dots (8)$$

Tomando la raíz cúbica de ambos miembros de la ecuación 8 y ordenando los términos obtenemos la ecuación 9

$$(t/y)^{1/3} = 1 / (2.3 K L_0)^{1/3} + [(2.3 K)^{2/3} / 6 L_0^{1/3}] t \dots(9)$$

A partir de la ecuación 9 puede llevarse a un gráfico el valor de $(t/y)^{1/3}$ en función de t , lo que da una línea recta; a partir de la cual se obtiene:

$$\text{Pendiente} = B = (2.3 K)^{2/3} / 6 L_0^{1/3} \dots(10)$$

$$\text{Intersección} = A = 1 / (2.3 K L_0)^{1/3} \dots(11)$$

De donde surgen las ecuaciones 12 y 13 que resuelven las incógnitas.

$$K = 6B / 2.3A = 2.61 (B/A) \dots(12)$$

$$L_0 = 1 / (2.3 K A^3) \dots(13)$$

3.5 OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto en el agua, es el típico parámetro usado como indicador de la salud o pureza de un río. Si el OD es menor o igual a 5 mg/L, las formas de vida acuática se reducen. En un caso extremo, cuando las condiciones anaerobias existen; la mayor parte de las formas de vida mueren. Un gran número de factores afectan el valor del OD existente en el río. En condiciones sin oxígeno prevalecen los lodos flotantes, gases olorosos, burbujeo y crecimiento de fango.

Las plantas proporcionan OD durante el día, pero lo remueven durante la noche, y con la respiración de los organismos también se remueve el oxígeno. En verano, el aumento de la temperatura reduce la solubilidad del oxígeno: cuando éste fluye de la atmósfera para entrar hacia el agua.

Proponer un modelo que contenga todos estos efectos, entre otros y todas sus interacciones, sería muy complejo para calcularse. Un análisis simple, consiste en considerar los parámetros más importantes que afectan al OD. Esto mediante un modelo que involucra sólo dos procesos para el oxígeno requerido en un río.

1. El oxígeno que remueven los microorganismos durante la biodegradación.
2. La provisión de oxígeno mediante reaeración en la superficie del río.

En este modelo se asume que el agua y las descargas, fluyen río abajo mezclándose uniformemente, y no existe dispersión de los desechos en dirección del flujo. A estas condiciones de flujo se les denomina flujo tapón.

La Demanda de Oxígeno de las aguas residuales es ejercida por tres clases de materiales: (a) Materiales Orgánicos Carbónicos; utilizables como fuente de alimento por los organismos aeróbicos, (b) Nitrógeno Oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas (Nitrosomas y Nitrobacter) además de (c) ciertos compuestos químicos reductores (ión ferroso, sulfitos, sulfuros y aldehídos) que reaccionan con el oxígeno disuelto molecular (Ramalho, 1991).

El oxígeno se disuelve en el agua por contacto del aire con la superficie, hasta alcanzar el punto de saturación a una temperatura determinada, a la temperatura de 0°C el punto de saturación del oxígeno es de 14.6 ppm, esta concentración disminuye al aumentar la temperatura del agua, de manera que al aumentar la temperatura, la concentración del oxígeno disuelto disminuye a menos del punto de saturación (Manual de Tratamiento de Aguas Negras, 1994).

• DETERMINACIÓN DEL OXÍGENO DISUELTO

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos. Se han desarrollado una serie de métodos empíricos para evaluar la concentración de contaminantes en aguas residuales.

Los métodos analíticos para contaminantes orgánicos se clasifican en dos grupos:

Grupo 1. Métodos de evaluación para la demanda de oxígeno.

- (1) Demanda teórica de oxígeno (DTeO).
- (2) Demanda química de Oxígeno (DQO).
- (3) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- (4) Demanda total de oxígeno (DTO).

Grupo 2. Métodos para evaluación de parámetros de contenido en carbono.

- (1) Carbono orgánico teórico (COTe).
- (2) Carbono orgánico total (COT).

La demanda teórica de oxígeno sólo puede evaluarse si se dispone de un análisis químico completo de un agua residual, es un valor calculado que corresponde a la cantidad estequiométrica de oxígeno requerida para oxidar completamente un determinado compuesto. En la práctica su utilización es muy limitada ya que se cuentan con métodos indirectos para las determinaciones que son de alta simplicidad. éste es el caso del oxígeno disuelto (Ramalho, 1991).

Actualmente al mercado existe una gran variedad de equipos para la medición de éste parámetro, el "oxímetro" es un equipo sencillo que permite hacer la medición directa con sólo introducirlo en el agua que va a ser analizada.

Otro tipo de analizadores se basan en la oxidación del ión yoduro (I^-) contenido en el reactivo utilizado, a yodo (I_2) por el oxígeno disuelto de la muestra, la valoración del yodo se hace con tiosulfato sódico ($Na_2S_2O_3$), utilizando almidón como indicador. La oxidación se lleva al cabo en medio ácido (H_2SO_4) en presencia de sulfato de manganeso ($MnSO_4$). El reactivo utilizado es una solución de NaOH, NaI y NaN_3 (Ramalho, 1991). Todo este procedimiento resume la técnica de Winkler para la determinación de la DBO.

3.6 REAIREACIÓN

La reaireación fundamentalmente consiste en la transferencia de oxígeno atmosférico al agua (Masters, 1991).

El flujo turbulento en una corriente sobre las piedras, riscos y rápidos, aumenta la velocidad de dilución del oxígeno en el agua; esto es oxígeno adicional para la descomposición bioquímica de los sólidos orgánicos putrescibles (Manual de Tratamiento de Aguas Negras, 1994).

La explicación más simple del mecanismo de transferencia de gases es la dada por la teoría de la doble película. De acuerdo con ésta, la presencia de dos capas, una líquida y otra gaseosa, la interfase gas-líquido proporciona la mayor resistencia al paso de las moléculas de la masa en fase gaseosa a la líquida (Ramalho, 1991).

Por ejemplo, podemos citar:

- ▶ Gases de baja solubilidad en fase líquida.
(Absorción de oxígeno por un agua residual)
- ♦ Gases de gran solubilidad en fase líquida
(Absorción de SO_2 en agua)

Desde los años 50's se han propuesto una cantidad de relaciones empíricas que relacionan varios parámetros del río para obtener la constante de reaeración; pero se debe contar con los datos necesarios para hacer uso de ello; sin embargo las constantes típicas de reaeración para varios cuerpos de agua se encuentran reportadas en la tabla 4, en caso de no contar con datos particulares del río.

Las expresiones más comunes son las que describen las ecuaciones 14, 15 y 16.

Tennessee Valley

$$K_r = 5.23 * v / H^{1.67} \dots(14)$$

Churchill

$$K_r = 5.026 * (v^{0.969} / H^{1.673}) \dots(15)$$

O' Connor y Dobbins

$$K_r = (3.9 * v^{0.5}) / (H^{1.5}) \dots (16)$$

Las tres ecuaciones involucran los parámetros de velocidad (v) y profundidad (H), obteniendo el valor de "kr" que es la constante de reaeración en días⁻¹.

TABLA 4. CONSTANTES TÍPICAS DE REAIREACIÓN

CUERPO DE AGUA:	Rango de k_r @ 20°C
Lagos pequeños	0.10 - 0.23
Lagos grandes calmados	0.23 - 0.35
Corrientes grandes de baja velocidad	0.35 - 0.46
Corrientes grandes de velocidad normal	0.46 - 0.69
Corrientes rápidas	0.69 - 1.15
Rápidos / Caídas de agua / Cascadas	> 1.15

Fuente: Masters, 1991.

3.7. MODELOS MATEMÁTICOS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Nuestro objetivo de estudio presenta las alternativas dentro de un contexto ingenieril, con diversos puntos de vista que invariablemente involucran los aspectos económicos, políticos y sociales que no serán determinantes; pues la afinidad entre calidad del agua y el ambiente inmediato representarán la decisión final.

El panorama completo se puede presentar en dos bloques, donde básicamente el bloque sombreado engloba el contexto ingenieril.

<ul style="list-style-type: none"> ◆ Establecer el uso del agua (objetivo) ◆ Conocer la calidad del agua ◆ Examinar las causas y efectos ◆ Proponer las alternativas 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Diseñar un programa de control ◆ Estimar los costos y beneficios del programa ◆ Re-evaluar los objetivos en un contexto político y social.
--	--

Cada punto dentro del contexto ingenieril tiene suma importancia: se ha establecido que algunas comunidades usan el agua de los ríos como su principal fuente de abastecimiento, pero que se torna en un riesgo cuando la calidad de éstos es inapropiada; por ello se deben considerar las causas que están ocasionando tal deterioro y los efectos que trae a las comunidades y la biota del río. Para ello se recurre a los modelos matemáticos, ya que describen el comportamiento de los parámetros de interés.

Un modelo matemático es un simple análisis de lo abstracto del mundo real. No pretende incorporar todos los fenómenos por raros que sean, sólo las partes más relevantes del problema a considerar.

El término simulación ha sido usado por una variedad de autores para describir diferentes clases de modelos. Esta técnica se lleva a cabo con la creación de un modelo matemático que simula los cambios en la calidad del agua de algún cuerpo acuático; con una variedad de maneras para resolverlo, pero siempre sustentado por dos pilares.

- 1) Análisis del sistema. Este puede ser teórico, observacional o experimental.
- 2) Síntesis de una réplica matemática de los sistemas.

El objetivo principal que se tiene al formular un modelo, es el de alcanzar la simplicidad al máximo, con un alto grado de exactitud y detalle.

Los pasos en la formulación de un modelo se resumen de la siguiente manera:

- ▶ Definición del problema
- ▶ Revisión de la teoría que le antecede
- ▶ Formulación de las ecuaciones

- ♦ Creación de una estructura matemática (modelo)
- ♦ Formulación de métodos para resolver las ecuaciones
- ♦ Formulación de métodos computacionales y la
- ♦ Validación del modelo

y se explican como sigue:

(Water Quality Modelling, 1993)

(A) La definición del problema. Al definir un problema se formulan los objetivos que se desean alcanzar: estos deben ser claros y cuantitativos como sea posible, pues el fracaso de los objetivos es normalmente por tener un modelo que no satisface la producción de resultados numéricos.

En cambio, con una declaración clara y cuantificable del rendimiento del modelo, se simplifican considerablemente los pasos subsecuentes en la formulación. Por consiguiente se debe tener cuidado en ajustar los modelos existentes a nuevos casos, ya que los objetivos no siempre son compatibles con la estructura del modelo.

(B) El repaso de la teoría. Esto debe ser un banco de información que permita la formulación de cualquier modelo, ya sea propuesto por uno mismo o la aplicación de uno existente a situaciones similares. Debe incluir un análisis de la calidad del agua, métodos de representación gráfica, e intervalos apropiados para el uso de los parámetros.

- (C) La formulación del modelo. Ésta envuelve una decisión sobre el tipo de modelo que va a utilizarse, [por ejemplo: determinístico, estado-estacionario, etc.] y que procesos se deben incluir. Hay que tener en cuenta que para evitar la complicación del modelo, deben eliminarse las relaciones que no afectan significativamente al rendimiento. Vale más examinar las alternativas del modelo o generar uno nuevo. Un diagrama conceptual a menudo es útil en esta fase, pues permite visualizar el fenómeno para la recolección de datos que deberán incorporarse.
- (D) La creación de la estructura del modelo. Generalmente es aconsejable empezar por identificar las subdivisiones grandes de un modelo y proceder por unir las con un diagrama de flujo. Éste ayuda a que sean más versátiles los modelos, pues establece el flujo global de la información del modelo y habilita subprogramas individuales que se desarrollan y prueban separadamente.
- (E) La formulación de la ecuación. El problema principal radica en que se debe escoger la mejor ecuación de varias formulaciones con base en la teoría y la estructura del modelo.

A menudo este proceso da como resultado un sistema de ecuaciones más claro, en el que las relaciones secundarias puedan ser fácilmente resueltas con los datos que van arrojando las primeras. En ocasiones son necesarios algunos datos preliminares para distinguir la mejor opción y establecer las ecuaciones. Una vez que sea posible describir la información mediante el uso de ecuaciones se podrán tener representaciones detalladas según el uso del modelo.

(F) La formulación de métodos de solución. En algunos casos especiales es posible resolver las ecuaciones de manera analítica, pero la mayoría de los modelos envuelven el uso de métodos numéricos, donde se deben resolver ecuaciones diferenciales parciales, interpolaciones, etc. Y para esto se elige una técnica numérica apropiada, por su estabilidad y exactitud.

(G) La realización de programas de computadora. Éste se puede llevar a cabo en cualquier máquina satisfactoria, desde una calculadora hasta una computadora. Sin embargo, para modelos complejos las computadoras son esenciales. El idioma de la programación más simple es el BASIC, que, junto con TURBO-BASIC y QUICK-BASIC, han proporcionado herramientas versátiles y poderosas para muchos propósitos del modelado. Aún cuando los idiomas de la programación más usados son PASCAL, C y FORTRAN.

(H) La comprobación y aprobación. Este proceso es necesario para repetir los resultados del modelo dentro de un nivel aceptable de error. Es esencial que los datos sean completamente independientes para la comprobación; pues la aprobación del modelo es un requisito obvio para poder representar un sistema de manera satisfactoria.

En cuanto a contaminación del agua, no han sido usados ampliamente los modelos con técnicas matemáticas, y en muchos casos estos han proporcionado buenos resultados.

La subdivisión más notable en los tipos de modelos es la siguiente:

1) Determinísticos: Estos tienen relaciones fijas entre la entrada y el rendimiento. El modelo con los mismos datos de entrada siempre dará el mismo rendimiento.

(2) Mecanísticos: Estos varían su nivel de representación. El modelo intenta representar cada proceso como un modelo distribuido combinando varios procesos a la vez.

Existen algunos sistemas de estado; éstos son dinámicos o estacionarios, y por lo tanto el modelo depende de ello. Si los procesos son dinámicos sus coeficientes cambian con el tiempo y dan lugar a un rendimiento variable, pero si los procesos mantienen sus coeficientes constantes con el tiempo, se obtendrán algunos modelos de estado estacionario con rendimiento fijo: ejemplo de esto es el modelo de Streeter y Phelps pues aún cuando comienza dinámico y la concentración de oxígeno disminuye con el tiempo, el sistema tiende al equilibrio en el punto crítico, y de ahí se sostienen las relaciones para su representación. Por lo que sólo dependerá este modelo de la entrada, y mantendrá sus coeficientes constantes.

Cabe mencionar que hasta el modelo más simple, requiere el uso de una computadora para resolverlo rápidamente, por lo tanto se necesita un grado de conocimiento en los idiomas de la programación a diferencia del que solamente desea correr un programa existente, que requiere como mínimo el conocimiento del funcionamiento de un sistema operativo como el MS-DOS.

Hay muchos lenguajes de programación que se han adoptado por no ser complicados. Sin embargo, BASIC es verdaderamente simple y útil. Algunas características que posee son las siguientes:

(a) Compiló formas como QUICK-BASIC, donde convierte la forma escrita a una codificación de la máquina antes de procesar el programa. Esto ayuda a detectar errores en el programa durante la aplicación.

(b) La forma de compilar interpreta cada declaración del programa. Esto tiene la ventaja de simplicidad pero puede volverse lento al ejecutarlo cuando los programas son muy grandes.

Los métodos numéricos son la forma de resolver la mayoría de las formulaciones y estos deberán programarse para llegar a las respuestas. Tan sólo con identificar los fenómenos físicos o químicos y las leyes fundamentales que gobiernan el sistema bajo consideración, al expresar estas leyes en una forma matemática se obtiene un modelo.

Frecuentemente, en calidad del agua, las ecuaciones no cuentan con soluciones sencillas; se busca simplificarlo al máximo para obtener una solución analítica y reducir la complejidad del problema. Cuando las consideraciones que se hacen siguen representando bien al sistema, es válido simplificar las ecuaciones; pero a menudo se reducen ecuaciones a un nivel que la solución analítica es complicada y sería más conveniente usar un método numérico en lugar de acercamiento analítico al hallazgo de una solución.

Algunas de las técnicas numéricas que pueden efectuarse con la ayuda de una computadora son las siguientes, y éstas forman la base de los modelos en calidad del agua.

Sistemas de ecuaciones simultáneas lineales:

- Determinantes / Cofactores
- Método de eliminación de Gauss

Métodos iterativos:

- Diferencias finitas para aproximar ecuaciones diferenciales
- Método de Runge-Kutta
- Método de pasos o caminos múltiples

3.8 MODELOS DE CALIDAD DE AGUA EN RÍOS

La mayoría de los cambios en los ríos son causadas por las descargas de materia orgánica (DBO), y esto da como resultado una disminución en la concentración del OD. Por lo que, los sistemas DBO-OD son un ejemplo de una situación general que necesita ser modelada.

La mayoría de los modelos de los ríos contienen una cognación entre las concentraciones de la demanda bioquímica de oxígeno y el oxígeno disuelto. Para analizar sistemas desde el punto de vista DBO-OD debemos incluir una formulación generalizada del modelo donde incluya ampliamente la variación de los parámetros de calidad del agua.

Desarrollos recientes, han incluido una amplia variedad de los parámetros de calidad del agua a los modelos; como lo son las reacciones bioquímicas o la forma de las estructuras hidrodinámicas, además de extender el rango de parámetros de calidad del agua. En cuanto a nuevas aportaciones en ríos, planean incorporar en dos y tres dimensiones las zonas de mezcla río-descarga para observar el efecto de difusión de la materia contaminante.

Sin embargo, los modelos que involucran principalmente la concentración de oxígeno presente en el agua, son los más usados para representar las condiciones de ríos, arroyos y estuarios.

- MODELO DE STREETER & PHELPS.

El uso de la representación matemática en calidad del agua en un sencillo modelo de oxígeno disuelto que fue construido por Streeter y Phelps, al analizar los efectos de las descargas de agua residual en la calidad del agua del río de Ohio (Thomann, 1972)

En los años comprendidos entre 1920 y 1950, el trabajo clásico de Streeter y Phelps con variaciones menores fue la base para predecir los efectos que causa el agua residual a diferentes cuerpos de agua. A finales de los años 50's con el incremento de la contaminación en sistemas de corrientes de agua, la utilización de los modelos matemáticos de calidad del agua aumentó rápidamente (Thomann, 1972).

El uso de estas técnicas de análisis requiere datos in situ, ya que varían significativamente de uno a otro cuerpo de agua y el problema para ser resuelto, debe ser suficientemente diverso en datos reales recolectados. Estos datos ayudan a dar forma al modelo, y verificar rápidamente su conveniencia.

Por lo tanto el requisito mínimo de datos de campo son los siguientes:

1. Concentración del oxígeno disuelto en el río antes de captar las descargas. Constantes de reaireación y de degradación pues son los dos fenómenos relevantes para este modelo.
2. La demanda bioquímica de oxígeno en puntos clave.
3. Además de datos característicos del río como velocidad, flujo, profundidad etc.

Claramente hay otros procesos en los ríos que alterarían el OD y la DBO tal como lo es la sedimentación, los sólidos en suspensión, la fotosíntesis, etc.

El modelo desprecia éstas contribuciones pues no son relevantes junto a la desoxigenación y reaireación. Estos fenómenos se pueden representar en forma matemática, donde la solución analítica de ellos (DBO-OD) da como resultado la ecuación del punto crítico para la concentración de oxígeno disuelto en un río: mejor conocida como la expresión de Streeter y Phelps.

➤ EXPRESIÓN MATEMÁTICA PARA LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

$$DBO : u \frac{\partial y}{\partial x} = -k_d y \dots(17)$$

➤ EXPRESIÓN MATEMÁTICA PARA EL OXÍGENO DISUELTTO

$$OD : u \frac{\partial O}{\partial x} = -k_d y + k_a(O_s - O) \dots(18)$$

Ambas, son ecuaciones diferenciales parciales, que para su solución es necesario integrar. La ecuación 19 muestra la expresión integrada de la ecuación 17.

$$DBO : y = y_0 e^{-k_d \frac{x}{u}} \dots(19)$$

La ecuación 20 es la sustitución de la ecuación 19 en la 18, y al ser ordenada para linealizarla resulta la ecuación 21.

$$OD : u \frac{dO}{dx} = -k_d y_0 e^{-k_d \frac{x}{u}} + k_a(O_s - O) \dots(20)$$

$$\frac{dO}{dx} + \frac{k_a}{u} O = \frac{-k_d y_0 e^{-k_d \frac{x}{u}}}{u} + \frac{k_a O_s}{u} \dots(21)$$

La ecuación 22 considerada como términos constantes se emplea para reducir la ecuación 21, donde el término con funcionalidad es el representado por la ecuación 23.

$$h = \frac{k_a}{u} \text{cte} \dots(22)$$

$$c(x) = \frac{-k_d y_0 e^{-k_d x/u}}{u} + \frac{k_o O_s}{u} \dots (23)$$

La forma de linealizar una ecuación es mediante las expresiones 24 y 25. Se sustituyen los términos y se efectúan las operaciones.

$$O(x) - O(x - \theta) e^{-P(x)} = \int_{x_0}^x c(\xi) e^{P(\xi) - P(x)} d\xi \dots (24)$$

$$P(\xi) = \int_{x_0}^{\xi} b(\eta) d\eta \dots (25)$$

Sustitución:

$$P(\xi) = b \int_0^{\xi} d\eta = b\xi = \frac{k_d}{u} \xi \dots (26)$$

$$P(x) = \frac{k_d}{u} x \dots (27)$$

Desarrollo:

$$O = O_0 e^{k_d x/u} \cdot \int_0^x \left(\frac{-k_d y_0 e^{-k_d \xi/u}}{u} + \frac{k_o O_s}{u} \right) e^{k_d(\xi-x)/u} d\xi \dots (28)$$

$$O = O_0 e^{k_d x/u} \cdot \int_0^x \frac{-k_d y_0 e^{-k_d \xi/u}}{u} e^{k_d \xi/u} e^{-k_d x/u} d\xi + \int_0^x \frac{k_o O_s}{u} e^{k_d \xi/u} e^{-k_d x/u} d\xi \dots (29)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_d y_o}{u} \int_0^x e^{-k_d \xi} e^{\frac{k_a}{u} \xi} d\xi - \frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_a O_s}{u} \int_0^x e^{\frac{k_a}{u} \xi} d\xi \dots (30)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \left(\frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_d y_o}{u} \right) \left(\frac{1}{k_a - k_d} \right) \left(e^{\frac{k_a k_d}{u} x} - 1 \right) + \left(\frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_a O_s}{u} \right) \left(\frac{1}{k_a} \right) \left(e^{\frac{k_a}{u}x} - 1 \right) \dots (31)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \left(\frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_d y_o}{u} \right) \left(\frac{u}{k_a - k_d} \right) \left(e^{\frac{k_a k_d}{u} x} - 1 \right) - \left(\frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \frac{k_a O_s}{u} \right) \left(\frac{u}{k_a} \right) \left(e^{\frac{k_a}{u}x} - 1 \right) \dots (32)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{k_a - k_d} \frac{k_d y_o}{u} \left(e^{k_a k_d \frac{x}{u}} - 1 \right) + \left(\frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{u} \right) \left(O_s \right) \left(e^{\frac{k_a}{u}x} - 1 \right) \dots (33)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \frac{e^{\frac{k_a}{u}x}}{k_a - k_d} \frac{k_d L u}{u} \left(e^{\frac{k_a k_d}{u} x} - 1 \right) - e^{\frac{k_a}{u}x} O_s \left(e^{\frac{k_a}{u}x} - 1 \right) \dots (34)$$

$$O = O_o e^{\frac{k_a}{u}x} - \frac{k_d L u e^{\frac{k_a k_d}{u} x}}{k_a - k_d} - \frac{k_d L u e^{\frac{k_a}{u} x}}{k_a - k_d} - O_s \left(1 - e^{\frac{k_a}{u} x} \right) \dots (35)$$

Solución: ECUACIÓN DE STREETER Y PHELPS

$$O = O_o e^{-k_a \frac{x}{u}} + \frac{k_d L u}{k_a - k_d} \left(e^{-k_a \frac{x}{u}} - e^{-k_d \frac{x}{u}} \right) + O_s \left(1 - e^{-k_a \frac{x}{u}} \right) \quad (36)$$

onde la relación de la nomenclatura se presenta en la tabla 5, ya que se ha usado la terminología de la literatura en el desarrollo matemático del modelo.

TABLA 5. RELACIÓN DE NOMENCLATURA

En la Literatura:	En la Tesis:	Significado:
y	DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
y_0, L_u	DBOu	Demanda Bioquímica de Oxígeno última
u	v	Velocidad
x	x	Distancia
k_d	k_d	Constante de degradación
n	n	Tiempo, en días
OD	OD	Oxígeno disuelto
k_a	k_r	Constante de reaireación
O_s	O_s	Oxígeno disuelto de saturación
O_0	OD inicial	Oxígeno disuelto inicial
O	O_{min}	Oxígeno mínimo

Al graficar OD vs. X, con base en la ecuación 36, esto es la concentración del oxígeno disuelto en el río a lo largo de la distancia que recorre, se obtiene la curva también conocida como de Streeter y Phelps (ver gráfico 3).

GRÁFICO 3. CURVA CARACTERÍSTICA DE STREETER Y PHELPS



X; Distancia en km

Por último, cabe señalar que en las ecuaciones 17 y 18 se han omitido las consideraciones, y están expresadas en forma reducida. Esto es, los términos de flujo en las fronteras en las expresiones de balance.

CAPÍTULO 4: REGULACIONES AMBIENTALES

La contaminación de los sistemas acuáticos es uno de los factores más importantes que rompe la armonía entre el hombre y su medio ambiente.

Una sistema acuático se considera contaminado cuando la composición del agua está directa o indirectamente modificada por la actividad del hombre, en una medida tal, que disminuye de su utilización para los fines a los que podría servir en su estado natural (Hernández, 1990).

Las descargas de aguas domésticas, desechos industriales y tiraderos de basura mal ubicados, han provocado cambios muy importantes en las propiedades físico-químicas y biológicas de las diferentes fuentes de abastecimiento.

El vertido de las aguas residuales debe realizarse una vez que las aguas hayan tenido cierto grado de tratamiento, para que el impacto producido al medio ambiente sea el menor posible. Lamentablemente no sucede así, por lo que se alteran de forma irreversible las condiciones ambientales de los diferentes cauces; superficiales y subterráneos.

4.1 COMPOSICIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL AGUA

Las aguas residuales que son vertidas en las diferentes fuentes de abastecimiento, generalmente están compuestas por sólidos, orgánicos e inorgánicos que pueden estar disueltos o suspendidos.

- COMPUESTOS ORGÁNICOS

La materia orgánica se divide en dos categorías: biodegradable y no biodegradable. El material orgánico biodegradable está compuesto por almidones, grasas, proteínas, alcoholes y ácidos, estos pueden ser de origen animal o vegetal e incluyen excretas, tejidos muertos y organismos. Los grupos principales de compuestos orgánicos presentes en el agua residual doméstica o industrial son las proteínas, que van del 40 al 60 %, los hidratos de carbono que van del 25 al 50 % y las grasas que contribuyen en 10% junto con sus productos de descomposición.

El aspecto perjudicial de la contaminación por compuestos orgánicos biodegradables, es la disminución del oxígeno disuelto como resultado de su utilización en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos, provocando perturbaciones indeseables en el medio acuático (Ramalho, 1991).

La materia orgánica no biodegradable incluye algunos compuestos que provienen de plantas muertas como la celulosa y los fenoles que son considerados como moléculas con enlaces excepcionalmente fuertes. Otros compuestos como los polisacáridos y estructuras con anillos como el benceno, son esencialmente no biodegradables y un ejemplo de éstos son los detergentes y el petróleo. Otra de las causas por las cuales la materia orgánica puede ser no biodegradable, es que sea tóxica, como los pesticidas; ya que algunos compuestos tóxicos con hidrógeno y carbonos en combinación con cloro son perjudiciales.

El exceso de los nutrientes disueltos causan contaminación cuando entran en una corriente de agua en cantidades suficientes para destruir la capacidad de asimilación de ésta, dicha contaminación se puede apreciar en los mecanismos de los procesos de descomposición microbiana; se puede llevar a cabo por procesos aerobios o anaerobios.

Los procesos aerobios son bioquímicamente eficientes y rápidos, y generan productos secundarios que casi siempre son químicamente simples y están altamente oxidados, como el anhídrido carbónico y el agua.

En tanto que los procesos anaerobios son lentos y bioquímicamente ineficientes, dan origen a productos secundarios químicamente complejos y malolientes. Estos procesos se dan cuando los nutrientes disueltos entran al agua en cantidad tal que para su degradación, el oxígeno disuelto se consume más rápido de lo que se puede reponer por reaeración, provocando la ausencia de oxígeno necesario. Por lo que los contaminantes se acumularán en el agua y la corriente quedará completamente contaminada.

- CONTAMINACIÓN NITROGENADA

La contaminación nitrogenada de las corrientes de agua proviene de fuentes naturales y adventicias, una enorme cantidad de nitrógeno que se encuentra en el aire se convierte en compuestos de nitrógeno por medios naturales, este proceso se conoce como fijación del nitrógeno (Winkler, 1994).

- CONTAMINACIÓN POR TEMPERATURA.

La contaminación térmica se produce por las descargas de desechos calientes en los cuerpos acuáticos. La causa fundamental de este tipo de perturbación es la construcción de centrales eléctricas de diversos tipos. Cada vez son más poderosas, principalmente las centrales de energía nuclear en las que por ejemplo, se requieren aproximadamente 500 m^3 de agua de enfriamiento por segundo. También contribuyen a este tipo de contaminación algunas industrias pesadas como la azucarera, las siderúrgicas y las textiles.

Las perturbaciones que pueden provocar son de diversa índole. En primer lugar el aumento de la temperatura ocasiona un descenso en la solubilidad de los gases, entre ellos el oxígeno que es necesario para la vida animal haciéndolo cada vez menos disponible. Al mismo tiempo, las temperaturas elevadas aceleran el proceso de putrefacción y por lo tanto un aumento en la demanda de oxígeno.

Por otra parte, las especies acuáticas que habitan en los lagos, mares o ríos se ven afectadas, ya que muchas de ellas como los animales de sangre fría son vulnerables a los cambios de temperatura. Así mismo se sabe que muchas especies se reproducen solamente a ciertas temperaturas, por lo que al ser modificadas pueden llegar a extinguirse (Múgica y Lara, 1996).

- COMPUESTOS INORGÁNICOS

Son compuestos generalmente de origen mineral como las sales, arcillas, grava y arena: éstos no están sujetos a degradación biológica, aunque hay ciertos compuestos como los sulfatos o carbonatos que pueden tener algunas transformaciones por óxido-reducción o por medio de otros fenómenos químicos.

El resultado más importante de los compuestos inorgánicos es su posible efecto tóxico, se ha documentado que la presencia en altas concentraciones de estas sustancias puede causar enfermedades y malformaciones, aún cuando hay casos en los cuales los contaminantes inorgánicos presentan demanda de oxígeno. (Por ejemplo los sulfitos y nitritos que se oxidan a sulfatos y nitratos, respectivamente.)

Por otro lado, los metales son otro tipo de contaminación que puede ser originada por disolución de depósitos naturales, de industrias mineras, de recubrimientos metálicos y fundidoras entre otros.

Entre los minerales no tóxicos se encuentran los iones calcio, magnesio, sodio, hierro, manganeso, aluminio, cobre y zinc; de los metales antes mencionados el metal más encontrado en aguas naturales es el sodio, debido a que es abundante en la corteza terrestre, se caracteriza por ser muy soluble en agua y altamente reactivo con otros elementos, por lo que resulta corrosiva en superficies metálicas. En concentraciones excesivas es tóxico para las plantas, puede causar un sabor amargo en el agua y ser un peligro para la salud en personas con problemas cardíacos o renales.

Algunos metales como el hierro (Fe) y el manganeso (Mn) se encuentran juntos con frecuencia y no representan riesgos a la salud, suelen encontrarse en sistemas desprovistos de oxígeno tales como aguas subterráneas o en el sustrato de lagos, éstos en pequeñas cantidades causan problemas de color.

Los metales tóxicos que normalmente se encuentran en las fuentes de abastecimiento son el plomo (Pb), zinc (Zn), mercurio (Hg), plata (Ag), níquel (Ni), cadmio (Cd), cromo (Cr), bario (Ba) y arsénico (As); su peligrosidad consiste en que se van acumulando a través de la cadena alimenticia, esta característica hace que dichos metales sean tóxicos para el hombre, animales y peces.

4.2 CONSECUENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN EN LA SALUD

Debido a la importancia que tiene el agua en la vida del hombre, si ésta está contaminada, se convierte en un medio con gran potencial para transmitir una amplia variedad de enfermedades. En países desarrollados las enfermedades hídricas son raras, lo que se debe esencialmente a la presencia de sistemas efectivos de abastecimiento de agua y eliminación del agua residual.

Sin embargo en países en vías de desarrollo, cerca de dos mil millones de personas no cuentan con un abastecimiento de agua seguro y saneado adecuadamente. En una encuesta reciente de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se destacan los siguientes hechos:

En los países en vías de desarrollo, el 80 % de todas las enfermedades son de origen hídrico, por lo cual cada día mueren aproximadamente 30,000 personas. Una cuarta parte de los niños, muere antes de cumplir los cinco años de edad, debido en su mayoría a las enfermedades hídricas. En la Tabla 6 se aprecian los lineamientos que la OMS propuso con relación a la calidad del agua para beber (Tebutt, 1997).

Estas infecciones son producidas por parásitos que viven en el intestino del hombre y que originan la enteroparasitosis, causada por los quistes de *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* y los huevos de los helmintos o *vermes*, éstos son evacuados por las heces fecales de las personas parasitadas y constituyen una fuente de infección. Este tipo de enfermedades son sumamente significativas en la salud de las comunidades que no cuentan con sistemas sanitarios de abastecimientos de agua, disposición de excretas y eliminación adecuada de basura y desperdicios.

Dichas enfermedades permanecen endémicas, debido a que se manifiestan cuando encuentran un medio fértil para conducirse; ya sea por las evacuaciones de las personas al aire libre o las descargas a sistemas de alcantarillado sin tratamiento posterior, dando como resultado la contaminación de las aguas de riego que afectan directamente los campos, especialmente los destinados a plantaciones de hortalizas que se consumen crudas.

Finalmente con todo esto pueden ser contaminados los cauces subterráneos, lagos, arroyos, lagunas, ríos, balnearios y playas. Para detectar la contaminación de las fuentes de abastecimiento se han establecido parámetros que evalúan la calidad del agua mediante concentraciones permisibles a dichos parámetros según la fuente.

TABLA 6. LINEAMIENTOS DE LA OMS EN LA CALIDAD DE AGUA PARA BEBER

Característica	Nivel de acción
Nitrógeno de Nitrato y de Nitritos	10 mg/l
Nitrógeno de Nitritos	1.0mg/l
Dureza como CaCO_3	500 mg/l
Turbiedad	5 UNT
Color	15 UUC
PH	6.5 a 8.5
Coliformes	Ausentes en 100 ml

Fuente: Tebutt, 1997.

4.3 LEGISLACIÓN MEXICANA EN MATERIA DE CALIDAD DE AGUA

Debido a los grandes problemas de contaminación que aquejan al mundo, los países han establecido normas de calidad del agua. En el caso particular de México se han creado normas oficiales, cuyo objetivo general es la prevención y conservación de las fuentes de agua que captan aguas residuales.

Para esto, las oficinas que previenen y controlan la contaminación de las aguas, prescriben que una corriente no deberá recibir descargas muy altas que impartan olores ofensivos, ni contener sólidos visibles flotantes o sedimentables, aceites o depósitos de lodos; puesto que agotan el contenido del oxígeno disuelto de las aguas receptoras.

Por razones de estética y de salud generalmente se ha considerado mantener los sistemas acuáticos en un alto nivel de calidad. Por lo que existen muchas normas severas aplicadas a corrientes usadas como fuente de abastecimiento.

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos promulgada el 5 de febrero de 1917, en su artículo 27; se establece "La propiedad nacional de aguas" y su control por el Gobierno Federal. En su artículo 73, se faculta al H. Congreso, el dictado de leyes sobre el aprovechamiento de las aguas de jurisdicción nacional. Diversas leyes y reglamentos se han expedido desde entonces; entre los cuales, los más recientes son los resumidos a continuación:

- MARZO DE 1973. Se creó el reglamento para la prevención de la contaminación del agua. Se determina el cumplimiento de los valores de cinco parámetros para la descargas de aguas residuales; éstos son: pH, sólidos sedimentables, grasas y aceites, materia flotante y temperatura.

- ENERO DE 1979. Se creó el reglamento para prevenir y controlar la contaminación del mar. Se establece que la Secretaría de Marina sea la responsable del cumplimiento del mismo.
- EN 1988. Se expiden varias técnicas ecológicas para el vertimiento de aguas, hoy derogadas y sustituidas por las normas técnicas mexicanas expedidas en octubre de 1993.
- NOVIEMBRE DE 1988. Se expide la "Ley Federal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente" que en su capítulo II del título IV contempla la prevención y control de la contaminación del agua y los ecosistemas acuáticos.
- DICIEMBRE DE 1989. Se publican los "Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua" y se dan los niveles máximos permisibles de concentración de 126 sustancias en fuentes de abastecimiento de agua potable para la recreación, riego agrícola, pecuario y protección de la vida acuática.
- NOVIEMBRE DE 1992. Se publica la "Ley de Aguas Nacionales" para regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas, su distribución y control; así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo sustentable.
- ENERO DE 1994. Se publica el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. La SEMARNAP expide la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales.

- JUNIO DE 1998. En el Diario Oficial de la Federación del 03 de junio, la SEMARNAP expide la, NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

De la misma forma en que han sido promulgadas leyes y normas para las aguas nacionales, cada sistema acuático es diferente; y los Estados están encargados de establecer lineamientos según los cuerpos de agua que en ellos se encuentren.

La Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente del Estado de Guerrero (1991); en su capítulo V, artículo 35 hace referencia a la evaluación del impacto ambiental diciendo: la realización de obras y actividades públicas o privadas que puedan causar desequilibrios ecológicos al rebasar los límites y condiciones señaladas en las disposiciones aplicables, deberán sujetarse a la autorización previa del Gobierno del Estado, siempre que no se trate de obras o actividades que competa regular a la Federación o estén reservadas a ella.

Por otro lado el artículo 36 dice que cuando se trate de la evaluación del impacto ambiental por la realización de obras o actividades que tengan por objeto el aprovechamiento de recursos naturales, se requerirá a los interesados que en la manifestación del impacto ambiental correspondiente, se incluya la descripción de los posibles efectos de dichas actividades en el ecosistema de que se trate, considerando el conjunto de elementos que lo conforman y no únicamente los recursos que serían sujetos de aprovechamiento.

Por lo tanto, se buscó la colaboración de los representantes de Ecología y Turismo en los municipios que el Instituto de Ecología Aplicada del Estado de Guerrero efectuó los muestreos, consiguiendo la participación del H. Ayuntamiento de Atoyac de Álvarez y San Jerónimo, para que observarán el trabajo de campo realizado y facilitarán la búsqueda de las descargas clandestinas de aguas residuales al río.

- CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA.

Estos precisan los parámetros que constituyen la calidad mínima requerida para calificar si un cuerpo de agua es apto para ser utilizado como fuente de abastecimiento de agua potable, para actividades recreativas, para riego agrícola, en uso pecuario, o bien, para el desarrollo y conservación de la vida acuática. En la tabla 7 se encuentran enlistados la mayor parte de los parámetros citados en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECA).

TABLA 7. CALIDAD DE AGUA REQUERIDA PARA SU USO, DE ACUERDO A LOS CECA

INORGANICOS			
Parámetros	Agua Potable	Protección de la vida acuática	
		Agua Dulce	Agua Marina (Áreas Costeras)
Alcalinidad (como CaCO_3)	400.0	<i>A</i>	<i>A</i>
Aluminio	0.02	0.05	0.2
Antimonio	0.1	0.09	-
Arsénico	0.05	0.2 (como As)	0.04 (como As)
Asbestos (Fibras)	3000	-	-
Bario	1.0	0.01	0.5
Berilio	0.00007	0.001	-
Boro	1.0	-	0.009
Cadmio	0.01	<i>B</i>	0.0009
Cianuro (como CN^-)	0.02	0.005	0.001
Cloro residual	-	0.011	0.0075
Cloruros (como Cl^-)	250.0	250.0	-
Cobre	1.0	<i>C</i>	0.003
Cromo Hexavalente	0.05	0.01	0.05
Hierro	0.3	1.0	0.05
Fluoruros (como F^-)	1.5	1.0	0.5
Fosfatos (como PO_4^{3-})	0.1	<i>D</i>	0.002
Fósforo elemental	-	0.0001	0.0001
Manganeso	0.1	-	-
Mercurio	0.001	0.00001	0.00002
Níquel	0.01	<i>E</i>	0.008
Nitratos (NO_3^-) (como N)	5.0	-	0.04
Nitritos (NO_2^-) (como N)	0.05	-	0.002
Nitrógeno amoniacal (como N)	-	0.06	0.01
Oxígeno Disuelto	4.0	5.0	5.0
Plata	0.05	<i>F</i>	0.002
Plomo	0.05	<i>G</i>	0.006
Selenio (como selenato)	0.01	0.008	0.4
Sulfatos (SO_4^{2-})	500.0	0.005	-
Sulfuros (como H_2S)	0.2	0.002	0.002
Talio	0.01	0.01	0.02
Zinc	5.0	<i>H</i>	0.09

FÍSICOS

Parámetros	Agua Potable	Protección de la vida acuática	
		Agua Dulce	Agua Marina (Áreas Costeras)
Aspectos Estéticos	<i>I</i>	<i>I</i>	<i>I</i>
Color (Unidades escala Pt/Co)	75.0	<i>J</i>	<i>J</i>
Conductividad Eléctrica (µmhos/cm)	-	-	-
Grasas y Aceites	ausente	-	-
Materia Flotante	<i>I.1</i>	<i>I.2</i>	<i>I.2</i>
Olor	ausente	-	-
Potencial Hidrógeno (pH)	5-9	<i>K</i>	<i>K</i>
Sabor	característico	-	-
Sólidos Disueltos	500.0	-	-
Sólidos Suspendedos	500.0	<i>J</i>	<i>J</i>
Sólidos Totales	1000.0	-	-
Temperatura °C	cond. nat. + 2.5	cond. nat. + 1.5	cond. nat. + 1.5
Turbiedad (Unidades de escala de sílice)	cond naturales	<i>J</i>	<i>J</i>

MICROBIOLÓGICOS

Parámetros	Agua Potable	Protección de la vida acuática	
		Agua Dulce	Agua Marina (Áreas Costeras)
Coliformes Fecales (NMP/100ml)	1000.0(<i>L</i>)	200.0	200.0

RADIOLÓGICOS

Parámetros	Agua Potable	Protección de la vida acuática	
		Agua Dulce	Agua Marina (Áreas Costeras)
Radioactividad:	0.1	0.1	0.1
Alfa Total (Bq/l)			
Beta Total (Bq/l)	1.0	1.0	1.0

* También existen, alrededor de 80 parámetros orgánicos NO INCLUIDOS

NOMENCLATURA:

- A. La alcalinidad natural no debe reducirse en más del 25%, ni cuando ésta sea igual o menor a 20 mg/L
- B. La concentración promedio de cadmio de 4 días en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder más de una vez cada 3 años, el valor numérico se obtiene con la ecuación 37.

$$\text{Cd } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.7852 \ln(\text{dureza}) - 3.490)} \dots(37)$$
Dureza = mg/L como CaCO_3
- C. La concentración promedio de cobre de 4 días en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder más de una vez cada 3 años, el valor numérico se obtiene con la ecuación 38.

$$\text{Cu } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.8545 \ln(\text{dureza}) - 1.465)} \dots(38)$$
Dureza = mg/L como CaCO_3
- D. En influentes de los embalses, el fósforo no debe exceder de 0.05 mg/L; dentro del embalse, menor a 0.0059 mg/L; y para ríos hasta 0.1 mg/L
- E. La concentración promedio de níquel de 4 días en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder más de una vez cada 3 años, el valor numérico se obtiene con la ecuación 39.

$$\text{Ni } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.8460 \ln(\text{dureza}) + 1.1645)} \dots(39)$$
Dureza = mg/L como CaCO_3
- F. La concentración de plata en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder el valor numérico dado por la ecuación 40.

$$\text{Ag } (\mu\text{g/L}) = e^{(1.72 \ln(\text{dureza}) - 6.52)} \dots(40)$$
Dureza = mg/L como CaCO_3

- G. La concentración promedio de plomo de 4 días en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder más de una vez cada 3 años, el valor numérico se obtiene con la ecuación 41.

$$\text{Pb } (\mu\text{g/L}) = e^{(1.273 \{ \ln (\text{dureza}) \} - 4.705)} \dots(41)$$

Dureza = mg/L como CaCO_3

- H. La concentración promedio de zinc de 4 días en $\mu\text{g/L}$ no debe exceder más de una vez cada 3 años, el valor numérico se obtiene con la ecuación 42.

$$\text{Zn } (\mu\text{g/L}) = e^{(0.8473 \{ \ln (\text{dureza}) \} + 10.3604)} \dots(42)$$

Dureza = mg/L como CaCO_3

- I. El cuerpo de agua debe estar libre de sustancias que:

1. Formen depósitos que cambien adversamente las características físicas del agua.
2. Contengan materia flotante que den apariencia desagradable.
3. Produzcan olor, sabor o turbiedad.
4. Propicien la vida acuática indeseable o desagradable.

- J. Los sólidos suspendidos en combinación con el color, no deben reducir la profundidad del nivel de compensación de la luz para la actividad fotosintética en más de 10% a partir del valor natural.

- K. No podrá haber variaciones mayores a 0.2 unidades de pH, tomando como base el valor natural estacional.

L. Con tratamiento convencional (Coagulación, filtración y desinfección)

NMP = Número más probable

Bq = Becquer

BHC = HCH = 1, 2, 3, 4, 5, 6 - hexaclorociclohexano

Niveles máximos en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad

En el caso de las descargas hacia el río Atoyac, se pueden considerar de manera general del tipo de agua residual municipal, y la Ley General del Equilibrio Ecológico aplica; más lo que está sucediendo en las diversas comunidades cercanas al río, es que las casas y negocios descargan directamente sin tener en cuenta la legislación, además de que el río es usado como 'lavadero' de los habitantes y las orillas son zonas para tirar la basura de la población.

Aún cuando Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, sirvan para calificar si un cuerpo de agua es apto para ser utilizado como fuente de abastecimiento de agua potable, esto no quiere decir que los sistemas acuáticos estén potabilizados y listos para suministrarlos. Las Normas Oficiales Mexicanas exigen sean cumplidas para que en efecto esto sea realizado.

Entre las principales normas referentes a este tema se encuentran la NOM-001-ECOL-1996 y la NOM-003-ECOL-1997 que establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales y los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, respectivamente; ambas sustentadas por las Normas Mexicanas para las determinaciones de los diversos parámetros.

La tabla 8 muestra los límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana-001-ECOL-1996 para los diferentes usos que se le da al agua de río

TABLA 8. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EL AGUA DE RÍO DE ACUERDO A LA
NOM- 001-ECOL-1996

Parámetros (mg/L)	Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Protección de vida acuática	
	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.
1. Temperatura (°C)	N.A.	N.A.	40	40	40	40
2. SS (ml/L)	1	2	1	2	1	2
3. SST	150	200	75	125	40	60
4. DBO	150	200	75	150	30	60
5. Nitrógeno total	40	60	40	60	15	25
6. Fósforo total	20	30	20	30	5	10

Donde: P.D. Promedio diario
P.M. Promedio mensual
N.A. No aplica

CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA

Este capítulo contiene la descripción de los procedimientos que se siguieron para la obtención de los resultados que fueron necesarios para la aplicación del modelo de Streeter y Phelps. También se indican todos los datos de campo y de laboratorio obtenidos; así como los necesarios para poder correr el programa de cómputo.

El trabajo se realizó en coordinación con dos instituciones:

1. El Instituto de Ecología Aplicada de Guerrero (INEAGRO), que fue titular del proyecto en el Sistema de Investigación Regional que patrocinó CONACYT.
2. El Instituto de Ingeniería (II) de la UNAM que apoya al INEAGRO con la participación de consultores en el ámbito ambiental.

De ahí se deriva que el trabajo de laboratorio se haya realizado en Chilpancingo, Gro. donde está ubicado el INEAGRO, con salidas esporádicas para los muestreos; mientras que el trabajo de gabinete se realizó en el II de la UNAM.

5.1 DATOS DE LOS MUESTREOS

Después de haber hecho el reconocimiento de las poblaciones que el río recorre y la ubicación de las descargas de aguas residuales al río, se establecieron las estaciones de muestreo que permitieran obtener los datos necesarios para el modelo.

El estudio se dividió en época de estiaje y época de lluvias, definiendo estaciones en donde se pudieran efectuar las mediciones³.

De todas las fechas de muestreo, el 04 de Noviembre de 1998 fue el representativo para la temporada de lluvias, y el del 15 de Abril de 1999 para la temporada de secas.

Cabe señalar que el trabajo de campo se llevó a cabo con la colaboración de varias personas: titulares del proyecto, consultores ambientales, tesisistas y representantes de ecología según el municipio en cuestión; formando así un equipo multidisciplinario. Entre ellas se encuentran:

➤ Dr. Octavio Klimek Alcaraz	DIRECTOR DEL INEAGRO
➤ M. en I. Adrián Jimenez Varela	DIRECTOR DEL PROYECTO
➤ M. en I. Fulvio Mendoza Rosas	CONSULTOR AMBIENTAL EXTERNO
➤ Ing. Andrés Cruz Martínez	INGENIERO AGRÓNOMO FIOTECNISTA
➤ Biol. Héctor Ventura Reyes	BIÓLOGO
➤ Biol. Ricardo Miranda Ríos	BIÓLOGO
➤ Ing. Edson Ojeda Sotelo	INGENIERO FORESTAL
➤ Víctor Pérez Garza	TESISTA DE LICENCIATURA
➤ Fernando Rodríguez Rojas	TESISTA DE LICENCIATURA

³ En el Anexo 1 se localiza el mapa de los puntos de muestreo de la Cuenca del río Atoyac, Gro.

• UBICACIÓN Y DESCRIPCIÓN BREVE DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO.

El monitoreo se realizó en trece estaciones que a continuación se describen:

1. El Paraíso

Posición:
N $17^{\circ} 20' 751''$
W $100^{\circ} 13' 74''$
Altitud: 780 msnm

En este lugar se iniciaron las mediciones, esto debido a que es la comunidad más representativa por su cantidad de habitantes, que son aproximadamente 4,500.
2. Las Juntas 1

Posición:
N $17^{\circ} 18' 23''$
W $100^{\circ} 21' 835''$

Esta zona vista en un mapa, asemeja una "Y" por lo que se nombra a dos estaciones de la misma forma, siendo la número uno la corriente de la derecha ubicándonos en la intersección. Esta corriente es la que proviene de la comunidad de El Paraíso.
3. Las Juntas 2

Posición:
N $17^{\circ} 18' 249''$
W $100^{\circ} 21' 848''$

En este punto aumenta considerablemente el ancho del río. Este punto de muestreo se localiza en la mezcla de las corrientes de Las Juntas 1 y del río Atoyac que proviene de las comunidades de Pie de la Cuesta y Santo Domingo.

4. **Mexcaltepec**
Posición:
N 17° 16' 447"
W 100° 24' 209"
Altitud: 50 msnm
- Es un tramo que recorre el río Atoyac, entre Las Juntas y La Presa. Durante este recorrido el río pasa por la comunidad del Salto, que es donde existe una gran cascada. El punto de muestreo se ubicó debajo del Puente de Mexcaltepec.
5. **La Presa**
Posición:
N 17° 14' 402"
W 100° 26' 233"
Altitud: 40 msnm
- A partir de este punto inicia la Ciudad de Atoyac, que es la cabecera Municipal de "Atoyac de Alvarez". Es aquí donde hace 50 años aproximadamente se construyó la presa de Atoyac; a 100 m de la caída del agua se está considerando la estación de muestreo. Las viviendas que se localizan al margen del río tampoco cuentan con drenaje, por no estar incorporados a la comunidad.
6. **Montes de Oca**
Posición:
N 17° 12' 869"
W 100° 26' 042"
Altitud: 40 msnm
- Montes de Oca es el nombre de la calle donde está ubicada la primer descarga de agua residual municipal en el recorrido del río. De la presa a esta estación son 2500 m y a partir de este punto, 9 de cada 10 personas usan fosa séptica; los que viven a la orilla del río descargan directamente; por lo que en esta zona también comienza a ser apreciable la contaminación por basura.

7. **5 de Mayo**
Posición:
N 17° 12' 869"
W 100° 26' 101"
Altitud: 40 msnm
- Es la ubicación de la segunda descarga de agua residual, donde la orilla del río es el lugar de acceso más amplio para que la gente tire su basura de forma clandestina; gran cantidad de ésta es arrastrada por la corriente hasta su punto final.
Aproximadamente son 300 m de la calle Montes de Oca a la calle 5 de Mayo.
8. **Rastro**
Posición:
N 17° 12' 760"
W 100° 26' 181"
Altitud: 40 msnm
- El Rastro descarga en forma discontinua hacia el margen del río y hacia el arroyo Cohetero que se une al mismo; éste viene ya contaminado por diversas descargas no cuantificadas de casas-habitación. De la calle 5 de Mayo al Rastro sólo son alrededor 250 m.
9. **Arroyo Cohetero**
Posición:
N 17° 12' 702"
W 100° 26' 207"
Altitud: 40 msnm
- Es una corriente pequeña que atraviesa el municipio de Atoyac y se une al río después de captar las descargas de la población a su paso.
10. **Mezcla del Arroyo Cohetero con el Río**
- Es la estación de muestreo ubicada 100 m río abajo del arroyo Cohetero.

11. **Arroyo Ancho**
El río recorre 2150 m del arroyo Cohetero al arroyo Ancho; éste es un arroyo de agua clara, conocido como Arroyo "Ancho" al compararlo con otros. Su corriente es lenta y cerca de él existe un ducto que descarga agua residual municipal; la corriente buscando camino se mezcla con el arroyo Ancho contaminándolo antes de que se una al río. Cabe mencionar que en esta zona se ven las últimas viviendas de Atoyac.
12. **San Jerónimo**
Es el nombre del poblado principal del municipio Benito Juárez; de Atoyac a San Jerónimo son 6750 m aproximadamente. Esta zona tiene una gran cantidad de arena y palmeras; por lo que la gente la busca con fines recreativos.
- Posición:
N 17° 08' 581"
W 100° 27' 885"
Altitud: 0 msnm
13. **Hacienda de Cabañas**
Es el nombre de la última comunidad sobre la trayectoria del río. A 3450 m de esta estación de muestreo se encuentra el estuario que muestra finalmente la incorporación del río al Océano Pacífico.
- Posición:
N 17° 05' 850 "
W 100° 28' 628"
Altitud: 0 msnm

- MEDICIÓN DE CAUDALES

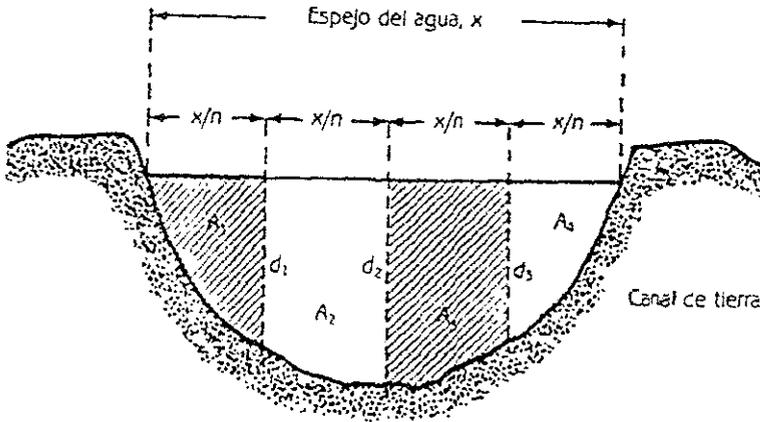
La medición de caudales se realizó en tres puntos del río. Mexcaltepec, Entrada a Atoyac y San Jerónimo;⁴ y en cada corriente que descarga aguas residuales al río. Mediante balances se obtuvieron los demás flujos volumétricos requeridos.

La forma de hacerlo fue la siguiente: Sabiendo que es necesario conocer el área del río y que su sección transversal construída en tierra, no es uniforme: la determinación del área se hizo dividiendo el espejo del agua en varios segmentos iguales, de tal forma que se tuvo una serie de figuras geométricas consistentes en triángulos y trapecios, cuyos lados estuvieron dados por las profundidades (d_i) del agua y las alturas, por la longitud del segmento (x/n), tal como se muestra en la figura 1. Al multiplicar el área de la sección transversal por la velocidad promedio de flujo, se obtiene el caudal de la corriente.

La velocidad se determinó por la técnica del flotador que al igual que en los tubos Pitot, métodos de la trayectoria y trazadores, se utiliza para medir la velocidad del caudal y no el gasto directamente (Briones, 1997).

En el Anexo 2 se encuentra la memoria fotográfico de todos las estaciones de muestreo.

FIGURA 1. SECCIÓN TRANSVERSAL IRREGULAR DE UNA CORRIENTE DESCOMPUESTA EN ÁREAS PARCIALES.



Los flotadores proporcionan una medición aproximada de la velocidad de flujo y se utilizan cuando no se requiere gran exactitud o cuando no se justifica la compra de dispositivos de aforo más precisos. De la misma forma para la determinación del área transversal de un río, cuando no son justificados los estudios de batimetría se recurre a la serie de figuras geométricas.

Durante la medición se registró el tiempo que tardó un pequeño flotador en recorrer una distancia conocida, marcándola previamente sobre un tramo recto y uniforme a lo largo de la prueba; se hizo por triplicado. En algunas descargas como la del rastro, no fue necesario este procedimiento pues bastó colocar recipientes para coleccionar cierto volumen en determinado tiempo.

El ancho y la profundidad se midieron al mismo tiempo, extendiendo una cuerda que sujetaron dos personas en ambos extremos del río; la cuerda estaba marcada metro a metro e introduciéndose una tercer persona en el río, caminó hacia cada una de las marcas metiendo una regla de madera hasta tocar el fondo e indicando la lectura; al llegar a la orilla opuesta de donde comenzó se conocieron también los metros que había recorrido. Por su parte, en la época de lluvias se introdujo una cuerda con un objeto pesado amarrado a ella para que llegara al fondo sujetándola desde la superficie, y al sacarla se midió la longitud de la cuerda equivalente a la profundidad del río.

De esta manera fue como se obtuvieron los caudales indicados en la tabla 9 para cada época de muestreo.

TABLA 9. CAUDALES Y VELOCIDADES DEL RÍO, EN ÉPOCAS DE ESTIAJE Y LLUVIAS.

Estación	Puntos de muestreo por orden de ubicación.	Caudal promedio en época de lluvias (m ³ /s)	Caudal promedio en época de estiaje (m ³ /s)	Velocidad promedio en época de lluvias (m/s)	Velocidad promedio en época de estiaje (m/s)
1.	El Paraíso	-	-	-	-
2.	Las Juntas 1	-	-	-	-
3.	Las Juntas 2	-	-	-	-
4.	Mexcaltepec	25.3	4.1405	0.54	0.2947
5.	La Presa	22.5*	0.05367*	0.4	2.3345E-2
6.	Montes de Oca	0.011	0.01875	0.33	0.25
7.	5 de Mayo	0.00156	7.978E-2	-	0.798
8.	Rastro	-	0.000145	-	-
9.	Arroyo Cohetero	0.2655	0.0682	0.4	0.4215
10.	Mezcla del Arroyo Cohetero con el Río	-	-	-	-
11.	Arroyo Ancho	0.3953	0.03043	0.22	0.3952
12.	San Jerónimo	16.8099	0.6148	0.3272	0.3813
13.	Hacienda de Cabañas	-	-	-	-

* Punto de Muestreo ubicado en la entrada a Atoyac. (Entre La Represa y La Montes de Oca)

5.2 DATOS DE LABORATORIO

- CALIDAD DEL AGUA / PARÁMETROS

En el laboratorio del INEAGRO fue realizada la medición de parámetros para cada una de las muestras obtenidas en los monitoreos ⁵. Se llevaron muestras de las corrientes de descarga para caracterizarlas, y muestras del agua 100m río abajo después de efectuarse la mezcla entre el agua del río y la de la descarga, para la determinación de la DBO₅. En las estaciones de muestreo 1,2,3,4, 5, 12 y 13 que corresponden a puntos en el río se les caracterizó para conocer la calidad del agua antes y después de las descargas.

- DETERMINACIÓN DE LA DBO

En las estaciones de muestreo 6, 7, 8, 9 y 11 que corresponden a descargas de aguas residuales, se nombró 6A, 7A, 8A, 9A y 11A a los puntos ubicados 100 m río abajo después de mezclarse con él la corriente contaminada. En estos puntos sólo se llevaron muestras para la determinación de la DBO; lo que implica que en estas estaciones se aplicó el modelo tomando como punto inicial la Presa.

El laboratorio del INEAGRO cuenta con incubadoras y matraces para la determinación; el método fue simple pues se utilizó un oxímetro para lecturas diarias de oxígeno disuelto, obteniendo así las tablas 10 y 11.

⁵ En el Anexo 4 se localizan los demás parámetros de calidad del agua

TABLA 10. DATOS DE OD Y DBO EN EL RÍO, EN ÉPOCA DE LLUVIAS.

DATOS OD y DBO DEL MUESTREO											
Estación	5		6A		7A		9A		11A		
días	OD	DBO									
Inicial	5.80	-	5.42	-	4.83	-	3.80	-	3.53	-	
1	2.97	5.66	4.97	0.9	3.82	2.02	0.32	6.96	2.71	1.64	
2	5.56	0.48	4.29	2.26	2.22	5.22	0.29	7.02	1.51	4.04	
3	4.88	1.84	4.30	2.24	1.63	6.4	0.22	7.16	0.63	5.8	
4	4.78	2.04	3.95	2.94	1.15	7.38	0.26	7.08	0.45	6.16	
5	4.40	2.8	3.28	4.28	0.78	8.1	0.23	7.14	0.22	6.62	

TABLA 11. DATOS DE OD Y DBO EN EL RÍO, EN ÉPOCA DE ESTIAJE.

DATOS OD y DBO DEL MUESTREO												
Estación	5		6A		7A		8A		9A		11A	
días	OD	DBO										
Inicial	7.81	-	7.14	-	5.53	-	6.36	-	5.45	-	5.80	-
1	7.35	0.92	6.40	22.2	5.39	4.2	5.54	49.2	4.36	32.7	58	6.6
2	5.20	5.22	4.94	66	4.14	41.7	4.23	128	4.15	39	4.33	44.1
3	4.85	5.92	4.40	82.2	4.01	45.6	4.10	136	3.86	47.7	4.06	52.2
4	4.38	6.86	3.93	96.3	3.82	51.3	3.83	152	3.75	51	3.98	54.6
5	4.12	7.38	3.73	102	3.75	53.4	3.73	158	3.69	52.8	3.56	67.2

5.3 DATOS DE GABINETE

- OXÍGENO DISUELTO DE SATURACIÓN

Los valores de oxígeno disuelto reportados en las tablas 10 y 11, son la cantidad de oxígeno presente en el agua de la estación de muestreo; a diferencia del oxígeno disuelto de saturación que representa el valor teórico de la cantidad máxima de oxígeno que podría haber en el agua a determinadas condiciones de presión y temperatura. Este oxígeno disuelto de saturación (ODs) tiene como base la Ley de Henry que involucra la presión parcial del O_2 en el aire y la concentración del O_2 en el agua.

$$P_{O_2} = H X_{O_2} \dots(43)$$

Donde:

P_{O_2} es la presión parcial del oxígeno atmosférico.

H es la constante de Henry.

X_{O_2} es la concentración de oxígeno disuelto en el agua

Las muestras de agua fueron tomadas en dos épocas distintas del año con diferentes horarios según el recorrido en el río, lo que contribuye a distintas temperaturas entre 20 y 35°C. La constante de Henry se encuentra reportada en la literatura a distintas temperaturas con intervalos de 5°C entre un valor y otro, lo que permite realizar una interpolación lineal para las temperaturas de las estaciones de muestreo y encontrar el valor de la constante de Henry que le corresponde.

La altitud a la que se trabajó fue entre 0 y 5 msnm, por lo que estuvimos a una atmósfera de presión; conociendo esto, podemos despejar X_{O_2} y convertir unidades de moles a gramos y de gramos a mg/L con ayuda de la densidad del agua, para conocer así los miligramos de oxígeno que pueden estar disueltos en un litro de agua; obteniendo así los datos de la tabla 12.⁶

TABLA 12. OXÍGENO DISUELTO DE SATURACIÓN CALCULADO PARA LAS ESTACIONES DE MUESTREO.

VALORES DEL OXÍGENO DISUELTO DE SATURACIÓN					
LLUVIAS			SECAS		
Estación	Temperatura (°C)	ODs (mg/L)	Estación	Temperatura (°C)	ODs (mg/L)
5	27	8.24	5	24.7	8.56
6A	30	7.86	6A	34.4	7.42
7A	35	7.36	7A	33.3	7.52
-	-	-	8A	31.8	7.67
9A	33	7.56	9A	32.7	7.58
11A	34	7.46	11A	32.3	7.62

En el Anexo 3 se localiza la Memoria de Cálculo

• CORRECCIÓN POR TEMPERATURA PARA LAS CONSTANTES

Las constantes que se son afectadas directamente por la temperatura, pueden expresar su dependencia con la ecuación de Van 't Hoff-Arrhenius.

$$K = A e^{-E/RT} \dots(44)$$

Donde "K" es la constante con dependencia a la temperatura, "A", es un factor de frecuencia; "T", temperatura absoluta; "R", constante universal de los gases, y "E" es la energía de activación. los valores normales de E para los procesos en el tratamiento de aguas residuales están en el intervalo de 2,000 a 20,000 calorías/gmol.

Derivando con respecto a "T" se obtiene la ecuación 45, e integrándola despreciando el efecto de la temperatura sobre la energía de activación, resulta la ecuación 46.

$$d \ln K / dT = E / RT^2 \dots(45)$$

$$\ln K = - E / RT + \text{constante} \dots(46)$$

Evaluando en los límites considerados se obtiene la ecuación 47.

$$\ln (K_2 / K_1) = [E (T_2 - T_1)] / (RT_1 T_2) \dots(47)$$

Teniendo en cuenta que muchos procesos de aguas residuales tienen lugar a temperaturas próximas al ambiente, el término $E / RT_1 T_2$ es casi constante, por lo que al sustituir tal término como "C" obtenemos la ecuación 48.

$$\ln (K_2 / K_1) = C (T_2 - T_1) \dots(48)$$

por lo tanto.

$$K_2 / K_1 = e^{C(T_2 - T_1)} \dots(49)$$

Haciendo $e^C = \theta =$ coeficiente de temperatura, se llega a la ecuación 50.

$$K_2 / K_1 = \theta^{(T_2 - T_1)} \dots(50)$$

La aplicación más común de la ecuación 50 consiste en la estimación de la constante "K" a una temperatura "T" a partir de su valor determinado experimentalmente a 20°C. Siendo así, se obtiene finalmente la ecuación 51 que es la expresión conocida para la corrección de las constantes por temperatura.

$$K_T = K_{20} \theta^{(T - 20)} \dots(51)$$

En la cual "K_T" es la constante de reacción a la temperatura de interés "T" en °C; y "K₂₀" es la constante de reacción a 20 °C. Aunque "θ" es aproximadamente constante, varía ligeramente con la temperatura y su valor apropiado debe ser estimado. Los valores que se dan a continuación son los recomendados por Schroeffer según el intervalo de trabajo (Ramalho, 1991).

$$\theta = 1.1354 \quad [04^\circ - 20^\circ C]$$

$$\theta = 1.056 \quad [20^\circ - 30^\circ C]$$

• CONSTANTES DE DEGRADACIÓN

En la determinación de las constantes de degradación, cabe señalar que para la aplicación de los métodos de Moore y de las diferencias finitas se requiere comenzar con una tabla de DBO de valores secuenciales, esto es intervalos constantes de 1 día, por ejemplo. Este requisito no es necesario para el método gráfico de Thomas; por lo que fue seleccionado para la obtención de las constantes de degradación, ya que éste permite eliminar puntos (coordenadas) que estuvieran fuera del comportamiento de la curva de la DBO al proceder de un error.

La descripción del Método de Thomas es la siguiente.

1. Graficar DBO vs. t
2. Hacer una tabla con los siguientes datos: $t, y, t/y, (t/y)^{2/3}$
3. Graficar $(t/y)^{2/3}$ vs. t , observar los puntos que salen del comportamiento de la línea recta esperada y eliminarlos.
4. Realizar una regresión lineal
5. Obtener k_d y DBO_u mediante las ecuaciones del método de Thomas.
6. Corregir por temperatura la constante de degradación obtenida.
7. Recalcular DBO_u y calcular la DBO_5

Las constantes de degradación que se obtuvieron son las reportadas en las tablas 13 y 14.

TABLA 13. CONSTANTES DE DEGRADACIÓN CALCULADAS EN ÉPOCA DE LLUVIAS

(04 DE NOVIEMBRE DE 1998)

Estación	Temperatura (°C)	Constante de degradación (días ⁻¹)	Constante corregida por temperatura
5	27	0.2276	0.3332
6A	30	6.5366E-2	0.1127
7A	35	0.1668	0.3777
8A	-	-	-
9A	33	0.5087	1.0330
11A	34	0.1584	0.3397

TABLA 14. CONSTANTES DE DEGRADACIÓN CALCULADAS EN ÉPOCA DE ESTIAJE

(15 DE ABRIL DE 1999)

Estación	Temperatura (°C)	Constante de degradación (días ⁻¹)	Constante corregida por temperatura
5	24.7	0.2025	0.2616
6A	34.4	0.1654	0.3625
7A	33.3	0.2024	0.4177
8A	31.8	0.2670	0.5079
9A	32.7	0.3069	0.6131
11A	32.3	0.1851	0.3618

- CONSTANTES DE REAIREACIÓN

Para este estudio se han considerado expresiones empíricas para la obtención de las constantes de reaireación del río Atoyac; eligiendo al azar dos de las tres expresiones para calcular una "kr" promedio. Resultando elegidas la de Churchill y la Tennessee Valley.

Con los datos de caudal de la Presa y los de caudal de cada descarga, mediante balance de materia se determinaron la velocidad de la corriente en los puntos de las mezclas después de efectuarse las descargas, para poder aplicar estas expresiones que involucran velocidad y profundidad. Resultando así las tablas 15 y 16 según la época del año.

TABLA 15. CONSTANTES DE REAIREACIÓN CALCULADAS EN ÉPOCA DE LLUVIAS

Estación	Constante de reaireación en días ⁻¹ para la época de lluvias.		
	Churchill	Tennessee Valley	Promedio
5	1.4239	1.4412	1.4325
6A	1.4246	1.4419	1.4332
7A	1.4246	1.4419	1.4332
8A	-	-	-
9A	1.4312	1.4487	1.4399
11A	1.4632	1.4822	1.4727

TABLA 16. CONSTANTES DE REAIREACIÓN CALCULADAS EN ÉPOCA DE ESTIAJE

Estación	Constante de reaireación en días ⁻¹ para la época de estiaje.		
	Churchill	Tennessee Valley	Promedio
5	0.8339	0.7698	0.8018
6A	1.1149	1.0388	1.0768
7A	2.2901	2.1834	2.2368
8A	2.2922	2.1855	2.2389
9A	3.2804	3.1637	3.2221
11A	3.7187	3.6010	3.6599

5.4 DATOS DE INCORPORACIÓN AL MODELO

Después de conocer la velocidad y el OD con los datos de los muestreos, y haber calculado la DBO_u y k_d por el método de Thomas, la constante de reaireación mediante el promedio de las ecuaciones de Churchill y Tennessee Valley y haber obtenido el OD de saturación por Ley de Henry; en las tablas 17 y 18 se presentan en resumen los datos necesarios para correr el programa.

TABLA 17. DATOS DE ALIMENTACIÓN AL PROGRAMA PARA LA ÉPOCA DE LLUVIAS
(04 DE NOVIEMBRE DE 1998)

Estación	5	6A	7A	9A	11A
Parámetro					
DBOu (mg/L)	1.6165	3.6981	4.2345	4.3185	3.5595
kd (días ⁻¹)	0.3332	0.1127	0.3777	1.0330	0.3397
v (km/d)	34.56	34.58	34.58	34.74	35.54
OD (mg/L)	5.80	5.42	4.83	3.80	3.53
kr (días ⁻¹)	1.4325	1.4332	1.4332	1.4399	1.4727
Os (mg/L)	8.24	7.86	7.36	7.56	7.46
d (m)	2500	300	500	2150	17300

TABLA 18. DATOS DE ALIMENTACIÓN AL PROGRAMA PARA LA ÉPOCA DE ESTIAJE
(15 DE ABRIL DE 1999)

Estación	5	6A	7A	8A	9A	11A
Parámetro						
DBOu (mg/L)	6.4421	122.7465	29.9886	91.0043	28.837	37.653
kd (días ⁻¹)	0.2616	0.3625	0.4177	0.5079	0.6131	0.3618
v (km/d)	2.0170	2.7216	5.7208	5.7260	8.2894	9.4780
OD (mg/L)	7.81	7.14	5.53	6.36	5.45	5.80
kr (días ⁻¹)	0.8018	1.0768	2.2368	2.2389	3.2221	3.6599
Os (mg/L)	8.56	7.42	7.52	7.67	7.58	7.62
d (m)	2500	300	250	250	2150	17300

CAPÍTULO 6: MODELO DE STREETER Y PHELPS

En este capítulo se indican las características del modelo de Streeter y Phelps aplicado para simular la calidad del río en términos de OD y DBO.

La adición de un modelo matemático a los problemas ambientales, constituye un criterio de las magnitudes del problema y la técnica de apoyo para la aplicación de la respuesta.

Los modelos son producto de las leyes de conservación, leyes de la termodinámica, cinética química, fenómenos fundamentales, y las restricciones inherentes a cada modelo.

El modelo que se presenta en este trabajo, es general; pero éste fue capaz de representar al sistema físico (Río Atoyac) en forma acertada.

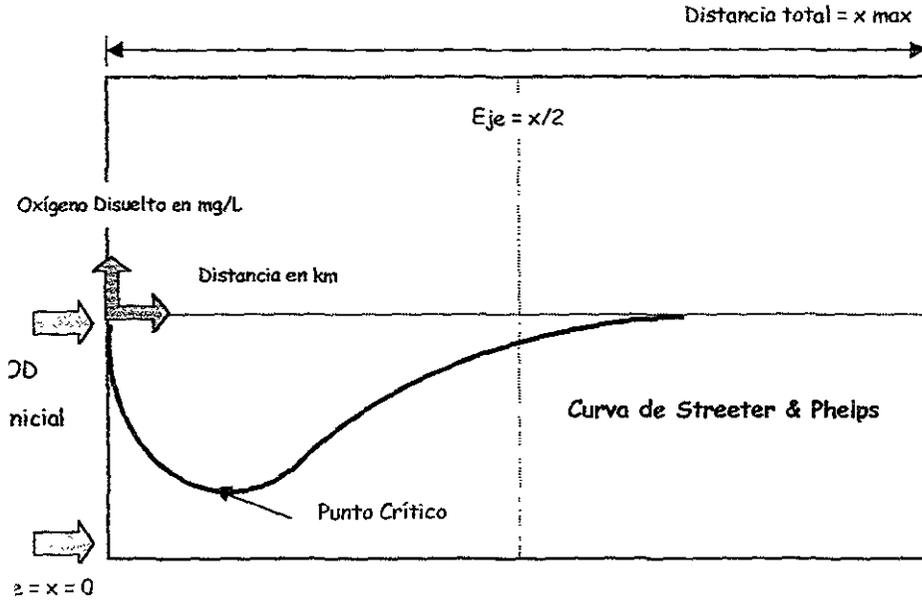
El modelo de Streeter y Phelps simula los cambios en la concentración del oxígeno disuelto con respecto a la distancia del río, después de ser receptor de corrientes contaminadas. El resultado gráfico presenta curvas convexas que señalan las zonas con déficit de oxígeno cuando predominan los contaminantes; para saber si el río puede asimilar el contenido de materia orgánica que se encuentra en él, es necesario conocer la distancia a la cual el río haría este trabajo, y de esta manera compararla con la que posee realmente. En el gráfico 4 se muestra una curva clásica del modelo de Streeter y Phelps.

La creación de un modelo matemático que involucre estos aspectos es lo que se mencionó como el trabajo clásico de Streeter y Phelps, donde la ecuación que describe el comportamiento, se ha programado en QBASIC nombrando al programa DBO-OD y para ejecutarlo se debe realizar la siguiente secuencia:

1. Entrar a QBASIC
2. Abrir el archivo DBO-OD⁷
3. En el Menú, ir hacia "Ejecutar"-Iniciar o solamente oprimir Shift+F5
4. Suministrar los datos con sus unidades correspondientes en el siguiente orden: kd, kr, Os, OD, v, DBOu y poner donde dice "x max" la distancia que va a ser analizada.
5. Oprimir "Enter" para que aparezcan los gráficos de DBO vs. x y OD vs. x, además de los datos Xc y O_{min} que muestran la distancia a la que se tiene el mínimo oxígeno disuelto en el río, siendo este el -Punto Crítico-.

⁷ El listado del programa se encuentra en el Anexo 5.

GRÁFICO 4. OD VS. X = CURVA DE STREETER Y PHELPS PROGRAMADA



• INTERPRETACIÓN DE LA CURVA DE STREETER Y PHELPS

El río trae consigo una cantidad de oxígeno disuelto que se ha denotado como OD inicial. Al captar el río una corriente que tiene un valor alto de DBO, significa que será necesario que microorganismos consuman oxígeno del río para que se lleve a cabo la degradación de la materia orgánica presente en la mezcla río-descarga. Por lo tanto el OD se verá disminuido afectando la biota del río.

El río a su vez tiene la capacidad de asimilar de forma natural parte de los contaminantes en él vertidos; pero se busca saber si es posible que se recupere con la distancia que recorre antes de entrar al mar.

De ahí, es el "mínimo" que presenta la curva de Streeter y Phelps; donde se denomina a éste como punto crítico, pues este punto representa el mayor déficit de oxígeno que se encuentra en el recorrido del río.

- INTERPRETACIÓN DE LA GRÁFICA OD VS. X PROGRAMADA

La gráfica se traza de acuerdo al comportamiento de una ecuación programada; por tanto tiene como base fundamentos matemáticos y no físicos.

Esto se refleja en los valores que se obtienen de oxígeno mínimo al ser introducidos los datos al programa, pues en algunos casos podrían dar números negativos; lo cual no es cierto y debe ser interpretado. Además de que los valores negativos al ser graficados quedan fuera de alcance, por lo que no se verían los puntos y la gráfica aparecería cortada.

CAPÍTULO 7: RESULTADOS

En este capítulo se hace referencia a los resultados y su evaluación obtenidos de encuestas realizadas en las poblaciones y de la aplicación del modelo de Streeter y Phelps programado, con el propósito de conseguir el objetivo de este estudio.

7.1 ENCUESTAS

Se realizaron alrededor de 1000 encuestas en zonas urbanas y rurales que circundan al río Atoyac, donde se busco conocer principalmente el uso y tratamiento que la gente le da al agua antes de consumirla. De manera genérica se hizo notar lo siguiente:

En zonas urbanas: El principal uso que le dan al agua que reciben del río es como agua de tipo doméstico, independientemente de que sea o no potable, por lo cual la mayor parte de la población clora el agua que consume. Cabe señalar que más del 50% de los encuestados utilizan al río con fines de esparcimiento. Por otro lado, la basura que desechan en estas zonas, la queman, la entierran o la dejan a la orilla del río.

En zonas rurales: Sigue siendo el uso principal del agua para fines domésticos, más ahora la mayoría la hierve antes de consumirla. Toda la basura que generan la arrojan al río. No cuentan con drenaje, todos evacuan a ras de suelo por lo que la gente piensa que las enfermedades que padecen se deben a sus hábitos higiénicos.

Diversas comunidades que no cuentan con el suministro de agua potable recurren a manantiales y arroyos para su consumo, pero la mayoría de las comunidades lavan sus trastes y ropa en el río. En la tabla 19 se encuentra el número de encuestas realizadas en las distintas comunidades.

TABLA 19. ENCUESTAS REALIZADAS EN LOCALIDADES RURALES Y URBANAS

Encuestas Rurales		Encuestas Urbanas	
Mexcaltepec	19	Arenal de Gómez	69
El Salto	20	Arenal del Centro	32
El Camarón	10	El Ticui	146
El Bálsamo	11	Las Tunas	90
Pie de la Cuesta	10	Hacienda de Cabañas	67
Santo Domingo	8	Corral Falso	69
Tres pasos	20	Arenal de Alvarez	48
El Cacao	20	San Jerónimo	186
		Atoyac de Álvarez	191
	$\Sigma=118$		$\Sigma=898$
		TOTAL	1016

7.2 APLICACIÓN DEL MODELO

Al aplicar el modelo de Streeter y Phelps a los distintos sitios ubicados dentro del río, se observó que en muchos casos el oxígeno disuelto disminuye río a bajo a partir de un punto donde exista una descarga, tan drásticamente que tiende hacia un valor casi nulo, nunca llega a ser cero ya que esto sería inconsistente con las leyes del equilibrio físico.

Lo anterior se debe a que el programa de cómputo realizado en este trabajo, tiene la capacidad de seguir asignando valores a la ecuación sin importar que los resultados que esté proporcionando correspondan a la realidad o no.

Se realizaron las corridas con el programa para los datos de cada punto de muestreo en el río⁸. De aquí se obtuvieron para cada sitio de muestreo los valores de distancia crítica y OD mínimo, datos que se expresan en la tabla 20.

TABLA 20. PUNTOS CRÍTICOS EN EL RÍO SEGÚN LA DESCARGA

ÉPOCA DE ESTIAJE.			
Punto de muestreo	Clave	Distancia crítica Xc	Oxígeno mínimo O mín
Presa	5	3.2 PC	7.2
Montes de Oca	6A	4.1 ZC	-3.6
5 de Mayo	7A	4.2 PC	3.4
Rastro	8A	4.7 ZC	-5.9
Arroyo Cohetero	9A	4.1 PC	3.5
Arroyo Ancho	11A	5.0 PC	4.5

Donde: PC...Punto Crítico

ZC...Zona Crítica

Cabe señalar que los valores indicados en la tabla 20, representan las condiciones del río para cada sitio de muestreo si es que no existiera una descarga posterior; lo cual es cierto sólo en el caso de la estación 11A.

La observación general es que ni aún eliminando cualquiera de las descargas, el río adquiere mejores condiciones. Cabe señalar que éstas no son desastrosas porque un valor de 4.5 en el oxígeno disuelto para la última descarga es "favorable" como se verá más adelante.

Por otra parte, en el caso de Lluvias ocurre lo siguiente para todas las corridas del programa en cada sitio de muestreo:

$$X \text{ crítica} = v * \log (ka / kd * (1 - (Os - OD) * (ka - kd) / (kd * DBOu))) \dots(52)$$

Cuando son sustituidos los valores se indetermina la función al obtener el logaritmo.

$$X \text{ crítica} = 34.58 * \log (0.9 / 0.1127 * (1 - (7.86 - 5.42) * (0.9 - 0.1127) / (0.1127 * 3.6981)))$$

= indeterminación \Rightarrow Se manifiesta con un *break* en el programa.

7.3 EVALUACIÓN

Con los datos de tabla 20, es notorio que el único punto donde no existe una disminución de oxígeno disuelto por debajo de 5 mg/L que establecen los CECA para la protección de la vida acuática sólo lo cumple la estación 5 que está en La Presa; esto es debido a que son las condiciones originales del río en la ausencia de todas las descargas, de ahí en adelante, todos los resultados tienen puntos o zonas críticas.

Las zonas críticas representan tramos largos donde el oxígeno es casi nulo, en tanto que los puntos críticos corresponden a una disminución mínima del OD a lo largo del río.

Los gráficos se presentan en el Anexo 5

Por otra parte, aunque ciertas especies acuáticas sobreviven en condiciones adversas; la problemática identificada en este río no es sólo para la biota del río. Existen poblaciones asentadas a lo largo del río que tienen como suministro directo, el agua del río.

Debido a esto se sugiere la construcción de una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales en Atoyac de Álvarez, o la implementación adecuada de la existente; que consta básicamente de lagunas de oxidación por aireación mecánica. La Planta de Tratamiento actual no está en operación por razones que se desconocen y quedan fuera del alcance de este trabajo el investigarlas.

Para esto, se propone como estrategia de saneamiento, el que se realice la conducción de todas las descargas hacia un ducto en común, que sea influente de la Planta de Tratamiento de Atoyac de Álvarez. Lo anterior generaría aproximadamente 0.1973 m/s de aguas residuales con una DBO total de 200.82 mg/L, lo cual indica un agua del tipo municipal típica.

Ahora corriendo el programa con este valor de DBO y las condiciones del punto 11A, el río nunca llega a recuperarse, si se considera que la descarga del agua residual sin ser tratada se hace en el punto antes mencionado. Al referirnos que no se recupera el río, se entiende que el OD en el río no alcanza las condiciones adecuadas para la vida acuática ni para ser considerado como fuente de abastecimiento de acuerdo con los CECA, en la distancia del punto 11A hasta su descarga al mar.

De acuerdo con lo anterior, si se busca el valor apropiado de DBO para conseguir que el oxígeno mínimo sea de 5.0 de acuerdo con los CECA, no sólo se beneficiarían las comunidades, sino también la vida acuática en agua dulce y en agua salada.

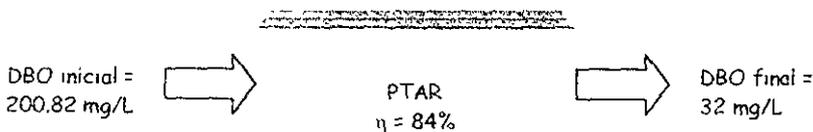
Para esto, se corrió el programa con los datos de la estación 11A iterando para la DBO; resultando así los datos indicados en la tabla 21.

TABLA 21. VALORES ITERADOS PARA LA DBO COMO DESCARGA ÚNICA

VALORES FIJOS	VALOR ITERADO	VALOR BUSCADO = 5.0 mg/L	
11A	DBO	O mín	Xc
$k_d = 0.3618$	29	5.2	6.5
$k_r = 3.6599$	30	5.1	6.7
$v = 14.6792$	31	5.03	6.9
$OD = 5.80$	32	5.0	7.0
$O_s = 7.62$	33	4.9	7.2
	32.5	4.9	7.1

De la tabla anterior puede notarse que con una DBO de 32 mg/L se obtiene la concentración de oxígeno disuelto de 5.0 mg/L deseada. Con esto se obtuvo la eficiencia de la Planta de Tratamiento que debe ser puesta en operación para evitar los problemas a la vida acuática y a las comunidades que utilizan el agua del río Atoyac. La eficiencia de la Planta debe ser del 84.0653%, respecto a la eliminación de DBO (ver figura 2).

FIGURA 2. EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO EN UNA PTAR



Siendo estrictos la DBO no es el parámetro fundamental para el diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, pero sí el más importante para el tratamiento biológico o secundario. Sin embargo cuando las descargas son de tipo municipal es muy acertado considerarlo así.

Si se compara en las Tablas de Calidad del Agua del Río Atoyac⁹ la concentración del oxígeno disuelto, con el valor obtenido por el modelo utilizado y se calcula el error, éste resulta del 11%.

Tener alrededor del 90% de confiabilidad con el modelo de Streeter y Phelps es muy bueno, ya que éste data de años atrás; comprobando que no ha perdido su validez, además de que es simple, fácil de programar y estima con certeza, para el caso de descargas de aguas residuales municipales típicas.

Por otra parte, como una opción más de saneamiento puede considerarse el tratamiento *in situ* de cada una de las descargas, de manera que se cumplan las condiciones adecuadas de OD y DBO a lo largo del río de acuerdo con los CECA. Sin embargo, es conocido que como alternativa es un tanto impráctica, ya que causa grandes complicaciones, tales como altos costos de operación y mantenimiento.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente, en este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones que surgieron de la realización de este trabajo.

8.1 CONCLUSIONES

En época de lluvias el río no presenta ningún problema en cuanto a la degradación de la materia orgánica o déficit de oxígeno, el caudal de las descargas prácticamente no aporta agua al cuantificarlas y la velocidad que lleva el río contribuye a que el efecto de dilución sea casi instantáneo.

En época de estiaje, el río se ve afectado a partir del municipio Atoyac de Álvarez donde el río no se recupera de forma natural, hasta un poco antes de unirse con el mar, los contaminantes en él vertidos se van asimilando lentamente llegando al estuario en las condiciones mínimas necesarias para preservar la vida acuática; pero a su paso existen comunidades que requieren sea mejor la calidad del agua, por lo cual es necesario darle tratamiento a las descargas antes de que se mezclen con el río.

El modelo de Streeter y Phelps es muy confiable para el caso de corrientes contaminadas por aguas residuales municipales. El error que genera el modelo está alrededor del 10%, además de ser simple y fácil de programar .

La estrategia de saneamiento propuesta, consiste en la conducción de todas las descargas hacia un ducto en común, para tratar las aguas residuales en una PTAR que tenga una eficiencia de remoción de DBO de al menos 84% .

8.2 RECOMENDACIONES

La Planta de Tratamiento que mitigue el problema de contaminación del río puede estar operando sólo la mitad del año, debido a que en lluvias no afecta cuanto se vierta en el río; esto reduciría costos de operación que se pueden convertir en costos de mantenimiento; no obstante podría operar todo el año manteniendo el río libre de descargas.

El Instituto de Ecología Aplicada de Guerrero debe:

- Continuar los estudios necesarios para determinar el comportamiento de algunos parámetros que definen la calidad del agua como fuente de abastecimiento. Por ejemplo, el SAAM, ya que la población está aprovechando el agua del río para lavar.
- Proponer el tren de tratamiento que remueva los contaminantes con las operaciones de potabilización que deben instalarse en las poblaciones que utilizan el agua como fuente de abastecimiento, completando las tablas de calidad del agua.
- Culminar el estudio, realizando una evaluación económica de diferentes opciones de Plantas para el tratamiento requerido.

BIBLIOGRAFÍA

- Briones Sánchez Gregorio y García Casillas Ignacio. "Aforo del Agua en Canales y Tuberías". Editorial Trillas, 1997
- CENAPRED "Metodología para el Saneamiento de Ecosistemas Acuáticos Contaminados por Fuentes Antropogénicas". María Esther Arcos Serrano y Georgina Fernández Villagómez
- Criterios Ecológicos de Calidad del Agua publicados en el "Diario Oficial de la Federación" el 13 de diciembre de 1989.
- Hernández M. Aurelio. "Depuración de Aguas Residuales. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos". Servicio de Publicaciones de Ingenieros de Caminos de Madrid (U.P.M.) 1990.
- M.en I. Fulvio Mendoza Rosas. Instituto de Ingeniería. Información personal. Ciudad Universitaria . México, D.F.
- M. en I. Adrián Jiménez Varela. Instituto de Ecología Aplicada del Estado de Guerrero. Información Personal. Chilpancingo, Gro.
- "Manual de Tratamiento de Aguas Negras". Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Editorial, Limusa S.A. 1994.
- Masters M. Gilbert, 1991. "Introduction to Environmental Engineering and Science". Prentice Hall.

Música Álvarez Violeta y Figueroa Lara Jesús. "Contaminación Ambiental, Causas y Control". UAM 1996

Perry. "Manual del Ingeniero Químico". Ed. Mc Graw Hill 1992

Ramalho R.S.,1991. "Tratamiento de Aguas Residuales". Ed. Reverté

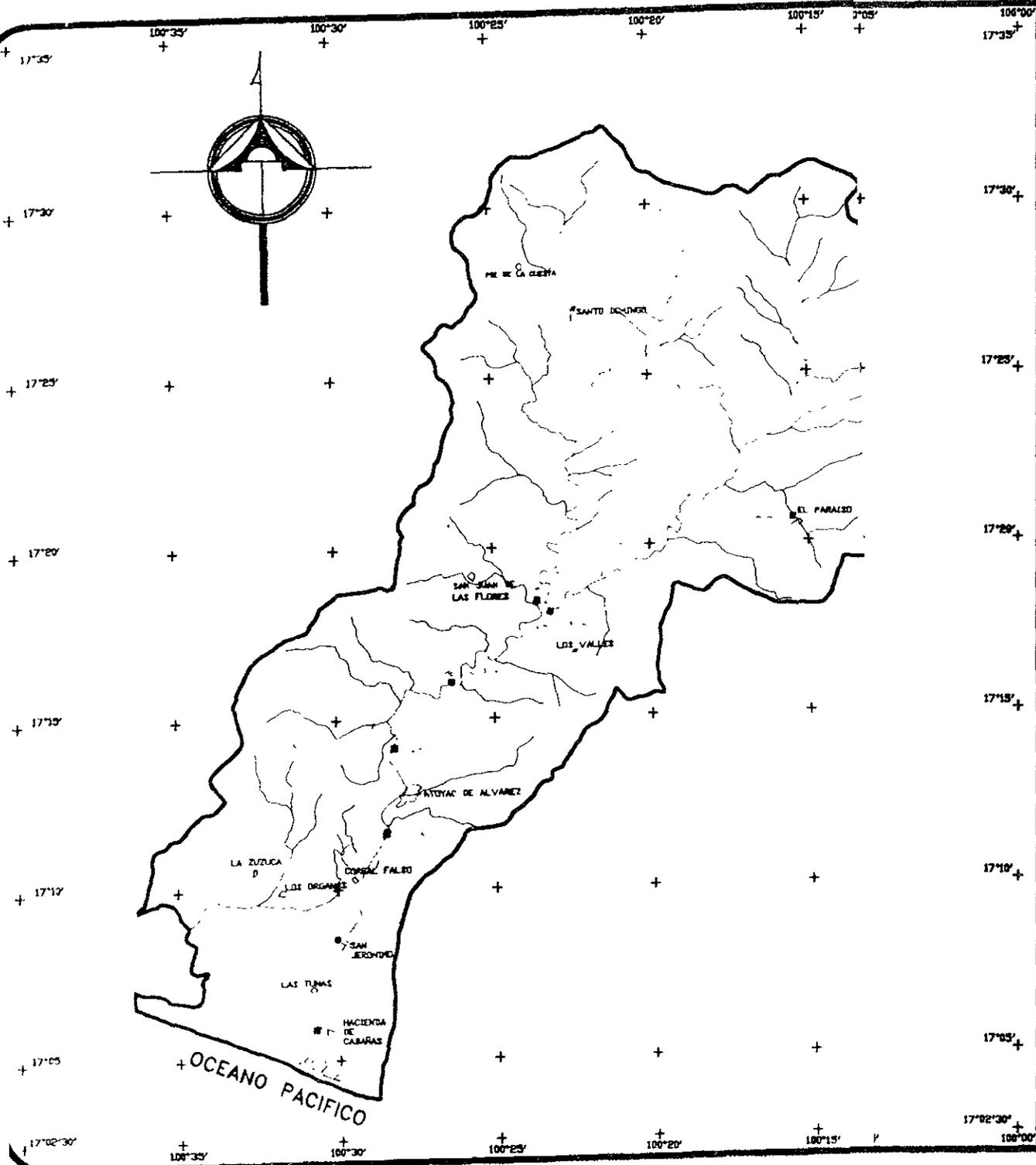
Tebutt, T.H. "Fundamentos de Control de Calidad del Agua". Ed. Limusa 1997.

Thomann Robert, 1972. "Systems Analysis and Water Quality Management". Mc Graw Hill Book Company

Winkler A. Michael. "Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho". Editorial Limusa S.A. 1994

Direcciones en Internet:

- <http://cenca.imta.mx/>
- <http://www.cna.gob.mx/>
- <http://www.imta.mx/>



INSTITUTO DE ECOLOGIA
APLICADA DE GUERRERO.

INEAGRU

MAPA DE PUNTOS DE MUESTREO
DE LA CUENCA
DEL RIO ATOYAC, GRO.

SIMBOLOGIA:

AFLUENTES.

CORRIENTE PRINCIPAL.

PUNTO DE MUESTREO.

LIMITE DE LA CUENCA.

POBLADO.

INFORMACION OBTENIDA DE:
FOTOGRAFIA AEREA DE INEGI
DE 1995.



0 1,000 2,500 5,000 10,000
ESCALA GRAFICA 1:250,000 MTS.

PROYECTO:

PLAN RECTOR PARA EL USO, MANEJO
Y CONSERVACION DE LA CUENCA
DEL RIO ATOYAC, GRO.

ELABORO:

M.C. ADRIAN JIMENEZ VARELA.
ING. OSCAR ALAIN MAJATA.
P.M.C. ALVARO LOPEZ ARELLANO.

REVISO:

DR. OCTAVIO KLIMEK ALCARAZ.

ANEXO 2: MEMORIA FOTOGRÁFICA

FOTOGRAFÍA 1.

PARAÍSO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 2.

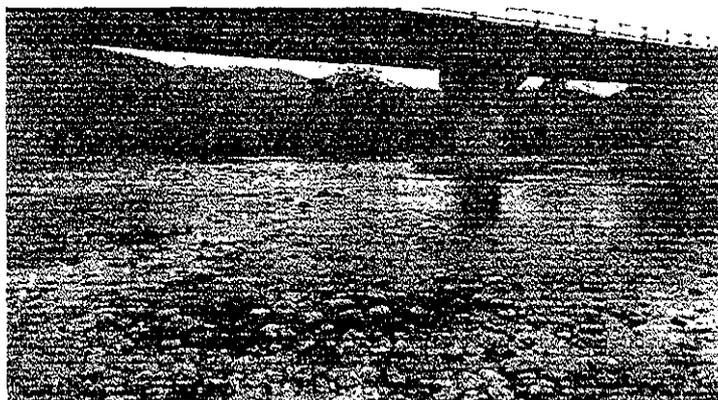
EL SALTO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 3. LAS JUNTAS EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 4. PUENTE DE MEXCALTEPEC EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 5. MEXCALTEPEC, MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 6. LA PRESA EN ÉPOCA DE LLUVIAS



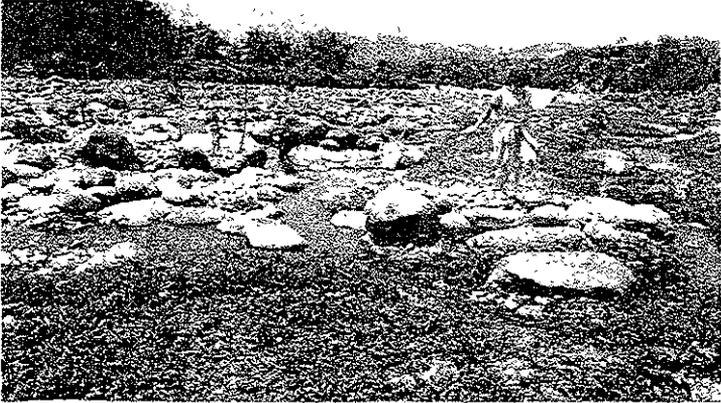
FOTOGRAFÍA 7. LA PRESA EN ÉPOCA DE ESTIAJE



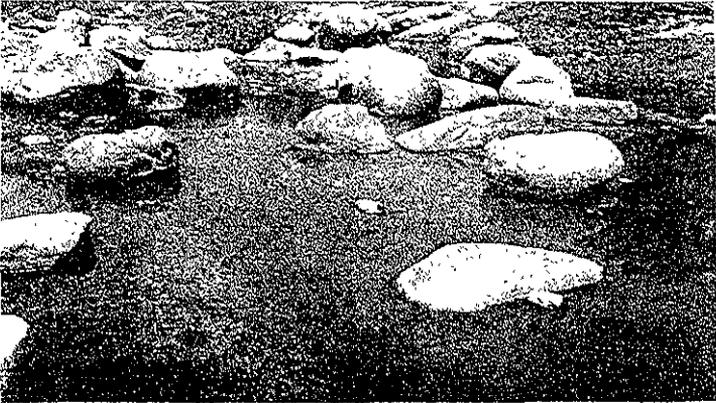
FOTOGRAFÍA 8. DESCARGA DE LA CALLE MONTES DE OCA EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 9. ENTRADA DE LA MONTES DE OCA AL RÍO



FOTOGRAFÍA 10. MEZCLA DE LA DESCARGA DE LA MONTES DE OCA CON EL RÍO



FOTOGRAFÍA 11. DESCARGA DE LA CALLE 5 DE MAYO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 12. DESCARGA DEL RASTRO HACIA LOS LÍMITES DEL RÍO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 13. DESCARGA DEL RASTRO HACIA EL ARROYO COHETERO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 14. ARROYO COHETERO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 15. MEZCLA DEL ARROYO COHETERO CON EL RÍO



FOTOGRAFÍA 16. ARROYO ANCHO EN ÉPOCA DE LLUVIAS



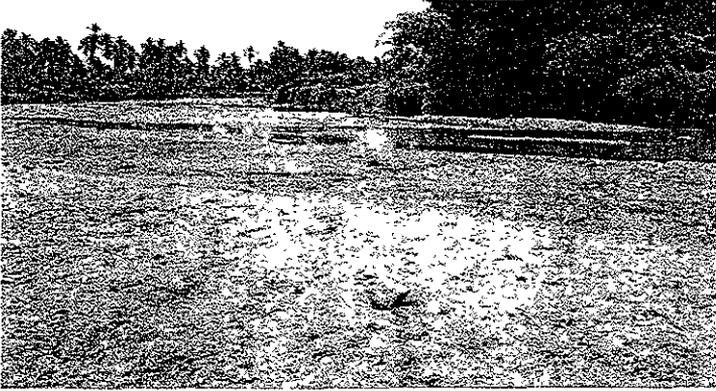
FOTOGRAFÍA 17. SAN JERÓNIMO EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 18. SAN JERÓNIMO, COMO LUGAR DE RECREACIÓN



FOTOGRAFÍA 19. HACIENDA DE CABAÑAS EN ÉPOCA DE ESTIAJE



FOTOGRAFÍA 20. ESTUARIO, UNIÓN DEL RÍO ATOYAC AL OCEANO PACÍFICO



FOTOGRAFÍA 21. MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN ÁTOYAC



FOTOGRAFÍA 22. MEDICIÓN DE PARÁMETROS EN LA PRESA



ANEXO 3: MEMORIAS DE CÁLCULO

• CÁLCULO DEL OXÍGENO DISUELTUO DE SATURACIÓN.

(Perry, 1992)

$$P_{O_2} = H X_{O_2}$$

1. Constantes de la Le de Henry para agua destilada:

$$@ 20^{\circ}C \Rightarrow H = 4.01 \text{ E4 atm/ fracción mol}$$

$$@ 25^{\circ}C \Rightarrow H = 4.38 \text{ E4 atm/ fracción mol}$$

$$@ 30^{\circ}C \Rightarrow H = 4.75 \text{ E4 atm/ fracción mol}$$

$$@ 35^{\circ}C \Rightarrow H = 5.07 \text{ E4 atm/ fracción mol}$$

Para diferentes temperaturas es necesario realizar una interpolación lineal.

$$f(x) \approx f(x_0) + (x - x_0) * f' [x_0, x_1]$$

$$f(x) \approx f(x_0) + \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} * [f(x_1) - f(x_0)]$$

$$f(x) \approx \left[\frac{1}{x_1 - x_0} \right] * \left[(x_1 - x) f(x_0) - (x_0 - x) f(x_1) \right]$$

Ejemplo.

La temperatura es $27^{\circ}C$, para realizar la interpolación se toman los valores de las constantes a 25 y $30^{\circ}C$

x_i	$f(x_i)$	$x_i - 27$
25	4.38 E4	-2
30	4.75 E4	3

$$f(27) \approx 1/5 * [(3) (4.38E4) - (-2) (4.75E4)] \Rightarrow f(27) \approx 4.53E4$$

Una vez conocido el valor de la constante de Henry a cierta temperatura se calcula la concentración del gas en el agua, considerando la presión parcial del gas en el aire de 0.21 atm por ley de Boyle.

La presión a nivel del mar es 1 atm

$$C_{O_2} = P_{O_2} / H_{O_2}$$

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{H_{O_2}} = 0.21 \Rightarrow P_{O_2} = 0.21 (1 \text{ atm}^*) = 0.21 \text{ atm}$$

$$C_{O_2} = 0.21 / 4.53E4 = 4.63E-6 \text{ moles de } O_2 / \text{ moles de } H_2O$$

$$C_{O_2} = (4.63E-6) (32) / (1 - 4.63E-6) (18) = 8.24E-6 \text{ g } O_2 / \text{ g } H_2O$$

$$H_2O = 1 \text{ g} / \text{ ml} = 1000 \text{ g } H_2O / 1 \text{ L } H_2O$$

Convirtiendo unidades gramos a miligramos por litro con la densidad:

$$C_{O_2} = 8.24E-6 \text{ g } O_2 / \text{ g } H_2O = 8.24 \text{ mg } O_2 / \text{ L } H_2O$$

CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DE DEGRADACIÓN

(Ramalho, 1991)

Es necesario obtener los valores de la Demanda Bioquímica de Oxígeno para cada día,

con los datos de oxígeno disuelto de la siguiente forma:

$$DBO_x = (OD_{\text{máx}} - OD_{\text{final}}) / \text{factor de dilución}^*$$

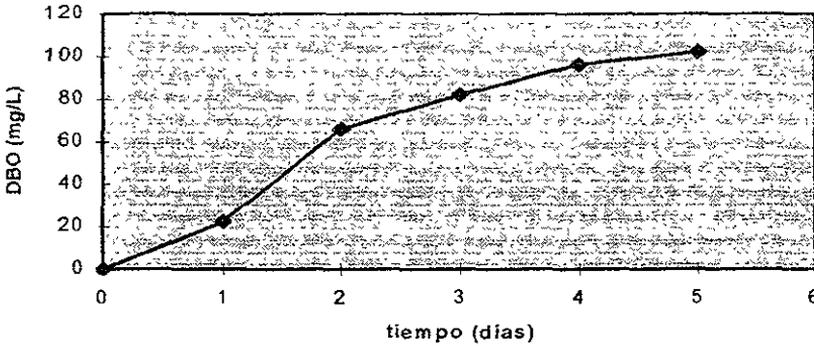
* El valor numérico es 0.5

Después se colocan en una tabla los siguientes datos:

Ejemplo para la estación 6A en época de estiaje.			
tiempo (días)	DBO (mg/L)	t / DBO	(t / DBO) ^{1/3}
0	0	-	-
1	22.2	0.0450	0.3560
2	66	0.0303	0.3122
3	82.2	0.0365	0.3321
4	96.3	4.153E-2	0.3467
5	102.3	4.887E-2	0.3660

Se grafica DBO vs. t para observar el comportamiento de la curva.

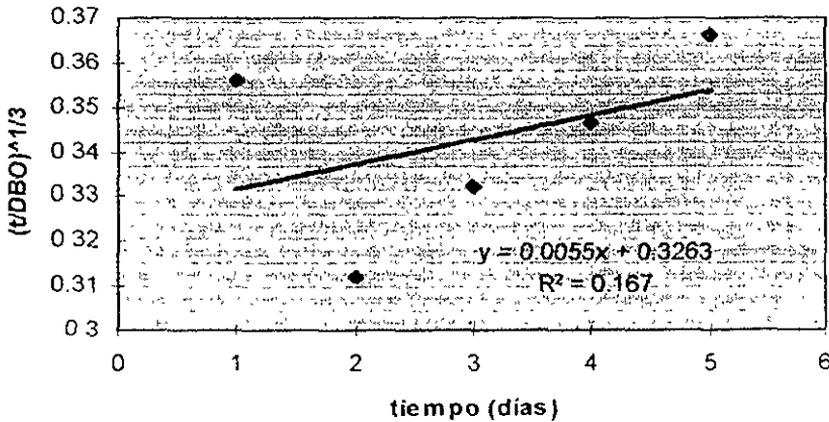
Demanda Bioquímica de Oxígeno



Se puede apreciar que el punto (1,0.3560) está fuera del comportamiento típico de la curva de la DBO, lo cual afectará en la regresión lineal.

Después se gráfica $(t / \text{DBO})^{1/3}$ vs. t y se realiza el ajuste lineal.

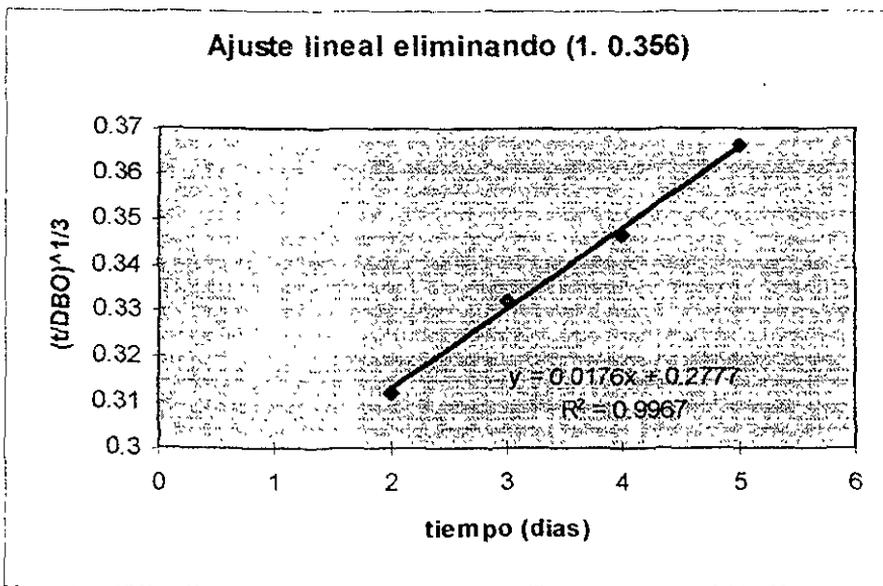
Ajuste lineal sin eliminar puntos



a correlación obtenida con la incorporación de todos los puntos en el ajuste es demasiado baja, lo que nos indica que la ecuación no es buena para que represente el comportamiento.

El método gráfico de Thomas permite eliminar los puntos que no se ajusten al comportamiento lineal en la determinación de las constantes de degradación; por ello fue elegido para este estudio.

Si es eliminada la coordenada (1, 0.3560) que le corresponde al primer punto, y se realiza nuevamente el ajuste estos son los resultados:



La correlación es la adecuada para que la ecuación represente al conjunto de datos.

La ecuación de la línea recta es del tipo $Y = BX + A$

Donde B es la pendiente y A es la intersección, para este caso a B le corresponde el valor de 0.0176 y para A el de 0.2777. Estos valores deben sustituirse en las siguientes expresiones que propone Thomas:

$$kd = 6B / 2.3A = 2.61 (B / A) = 0.1654$$

$$DBOu = 1 / (2.3 k A^3) = 122.735$$

Donde kd es la constante de degradación @ 20°C expresada en d⁻¹ y DBOu es la demanda bioquímica de oxígeno última expresada en mg/L.

Una vez obtenidos los resultados, es necesario corregir la constante de degradación a la temperatura correspondiente. Dicha temperatura es la del agua en el momento de tomar la muestra.

En la estación 6A en época de estiaje le corresponde una T de 34.4°C

La corrección por temperatura es mediante la expresión de Van 't Hoff Arrhenius, para este ejemplo queda expresada de la siguiente forma:

$$kd @ 34.4^{\circ}\text{C} = kd @ 20^{\circ}\text{C} * (1.056)^{(T - 20)}$$

$$kd @ 34.4^{\circ}\text{C} = 0.1654 (1.056)^{(34.4 - 20)} = 0.3625$$

La nueva DBOu corregida por temperatura se obtiene usando la misma expresión pero ahora con kd corregida por temperatura.

$$DBOu @ 34.4^{\circ}\text{C} = 1 / (2.3 k A^3) = 56.4335$$

De ahí también podemos calcular la DBO₅ @ 34.4 °C con la expresión que relaciona la DBOu con la DBO₅.

$$DBO_5 = DBOu * (1 - 10^{-5k})$$

$$DBO_5 @ 34.4^{\circ}\text{C} = 56.4335 (1 - 10^{-5(0.3625)}) = 55.5645$$

os datos son los que se encuentran reportados en la tabla de resultados para incorporarlos al modelo de Streeter y Phelps, se puede notar que el valor de la DBOu disminuye a la mitad, pues la kd aumenta al doble con la corrección por temperatura; por ello es necesario mantener una temperatura constante al realizar la determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en el laboratorio, en este caso fue 20°C. De lo contrario no debe realizarse la corrección, ya que afecta fuertemente a los resultados.

CÁLCULO DEL AREA DEL RÍO.

En los muestreos se obtuvieron los datos de ancho (D₂) y profundidad (D₁) para diferentes puntos en el río.

Datos del Arroyo Ancho en época de lluvias

	D ₁ (cm)	D ₂ (cm)		D ₁ (cm)	D ₂ (cm)
1	0.44	1.30	3	0.36	1.30
2	0.43	1.30	4	0.36	1.30

La sustitución es la siguiente:

$$= 0.44 (1.30/2) + 0.43 ((1.30+1.30)/2) + 0.36 ((1.30+1.30)/2) + 0.36 ((1.30+1.30)/2)$$

$$= 1.781 \text{ m}^2$$

BALANCES DE MATERIA

Mediante los balances de materia es posible tener información indirecta de los datos medidos; por ejemplo:

En el trabajo de campo fueron determinados los caudales de todas las descargas, no solo del río solamente en tres puntos (Mexcaltepec, Entrada a Atoyac y San Jerónimo); y esto se obtuvieron los datos del caudal que lleva el río 100 m adelante de cada descarga con la siguiente expresión:

$$Q = A \cdot v$$

donde: Q es el caudal en m^3/s

A es el área en m^2

v es la velocidad en m/s

Es importante señalar que al tener un nuevo caudal, necesariamente cambia la velocidad y el área de flujo, en este caso al ver el río, fue perceptible que su geometría es irregular, por lo que se consideró al área constante; y de ahí que también se tuvieron diferentes velocidades. Por ejemplo:

El caudal de la descarga de la Montes de Oca en época de estiaje es de $0.01875 m^3/s$

El caudal del río en la entrada de Atoyac lleva $0.05367 m^3/s$

Balance:

$$Q_5 + Q_6 = Q_{6A} \Rightarrow 0.05367 + 0.01875 = 0.07242 m^3/s$$

$$Q = A \cdot v \Rightarrow Q/A = v$$

$$v_{6A} = 2.299 m/s$$

$$v_{6A} = 3.1501E-2 m/s$$

$$\text{así sucesivamente... } Q_{6A} + Q_7 = Q_{7A} \Rightarrow v_{7A}$$

usando el mismo ejemplo, pero ahora con respecto a la demanda bioquímica de nitrógeno, también es posible conocer el valor teórico y compararlo con el experimental que se obtuvo en el laboratorio del INEAGRO para cada DBO₅ de las mezclas río-ragua sin corregir por temperatura de la siguiente forma:

$$l_{6A} = \frac{Q_5 * DBO_5 + Q_6 * DBO_6}{Q_{6A}}$$

Todos los subíndices indican la ubicación.

Esta ecuación proviene de la expresión de balance $Q_1 * x_1 + Q_2 * x_2 = Q_3 * x_3$ de x puede ser cualquier parámetro.

ANEXO 4: CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO ATOYAC

RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES EN LABORATORIO

LUGAR	MUESTREO EN ÉPOCA DE ESTIAJE 15 DE ABRIL DE 1999											
	DBO	A.T.	D.T.	Ca	Mg	SO ₄	PO ₄	SiO ₂	NO ₃	NO ₂	NH ₄	SST
Paraíso	72.9	19.1	55.28	6.89	9.22	11.9	0.094	0.547	29.4	13.8	0.266	94
Juntas 1	5.66	28.6	69.10	4.13	14.26	13.8	0.01	0.533	28.4	9.6	0.200	30
Juntas 2	8.06	28.6	65.64	9.64	10.06	16	0.017	0.528	16.3	10.3	0.151	170
Mexcaltepec	6.26	14.3	62.19	6.89	10.90	14.2	0.025	0.518	27.5	11.8	0.129	180
Presa	16.7	57.7	76.01	13.78	10.06	11.7	0.086	0.52	18.0	13.8	0.243	20
Atoyac	59.4	119.3	120.9	19.29	15.10	15.1	1.568	0.578	31.8	21.6	1.246	70
Sn. Jerónimo	7.5	81.1	89.83	15.15	12.58	7.75	0.212	0.586	74.8	18.9	0.186	50
Hda. de Cabañas	2.36	100.2	86.37	13.78	12.58	13.3	0.143	0.563	40.8	13.9	0.240	40
LUGAR	MUESTREO EN ÉPOCA DE LLUVIAS 04 DE NOVIEMBRE DE 1998											
Paraíso	54.2	1.215	50.58	4.03	9.8	65.33	71.82	0.389	0.16	0.008	0.22	10
Juntas 1	7.6	2.68	60.69	5.38	11.4	51.98	30.85	0.469	0.06	0.007	0.05	30
Juntas 2	8.95	1.95	57.32	5.38	10.4	44.80	41.95	0.447	0.09	0.005	0.03	150
Mexcaltepec	17.4	1.705	60.69	4.03	12.3	37.12	65.40	0.446	0.12	0.008	0.03	0
Presa	12.81	1.705	53.95	4.03	10.6	54.88	48.12	0.464	0.08	0.011	0.08	150
Atoyac	30.6	3.41	74.18	9.42	12.3	40.31	254.2	0.539	0.02	0.012	0.17	60
Sn. Jerónimo	8	2.19	57.32	5.38	10.6	39.80	67.8	0.494	0.03	0.007	0.08	10
Hda. de Cabañas	0	2.435	60.62	6.37	10.6	53.50	74.04	0.49	0.021	0.015	0.098	20

Donde: A.T. = alcalinidad total
D.T. = dureza total

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE MICROBIOLOGÍA

MUESTREO EN ÉPOCA DE ESTIAJE 15 DE ABRIL DE 1999		
ESTACIÓN	Coliformes Totales	Coliformes Fecales
Paraíso	37000	21000
Juntas 1	400	100
Juntas 2	500	500
Mexcaltepec	5400	200
La Presa	5800	100
Atoyac	90000	84000
San. Jerónimo	1300	300
Hacienda de Cabañas	4000	2700
MUESTREO EN ÉPOCA DE LLUVIAS 04 DE NOVIEMBRE DE 1998		
Paraíso	60000	44000
Juntas 1	3000	300
Juntas 2	3400	200
Mexcaltepec	2800	500
La Presa	9500	1800
Atoyac	5000	2000
San. Jerónimo	3000	2000
Hacienda de Cabañas	1000	800

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS IN SITU

MUESTREO EN ÉPOCA DE ESTIAJE 15 DE ABRIL DE 1999					
ESTACIÓN	pH	Turbiedad	Conductividad Eléctrica	Sólidos Disueltos Totales	Oxígeno Disuelto
Paraíso	6.62	14.7	96.2	48	5.58
Juntas 1	6.62	1.4	105.5	49	4.86
Juntas 2	7.24	2.35	97.5	46	4.26
Mexcaltepec	6.93	2.4	134.5	62	4.93
La Presa	6.69	5.64	290	144	3.35
Atoyac	7.19	19.2	325	153	3.83
San. Jerónimo	7.68	3.95	206	96	5.97
Hacienda de Cabañas	7.77	4.46	214	100	5.0
MUESTREO EN ÉPOCA DE LLUVIAS 04 DE NOVIEMBRE DE 1998					
Paraíso	6.48	4.11	64.8	31	5.57
Juntas 1	6.29	4.26	88.5	42	6.23
Juntas 2	6.77	7.93	91.2	43	5.66
Mexcaltepec	6.39	15.3	87.2	41	5.79
La Presa	7.43	33.1	82	38	6.84
Atoyac	7.42	19.8	154.7	73	5.03
San. Jerónimo	7.31	25.5	93.5	44	5.62
Hacienda de Cabañas	7.44	19.5	96.6	43	5.27

ANEXO 5: PROGRAMA DBO-OD GRÁFICAS

LISTADO DEL PROGRAMA EN QBASIC

GRÁFICAS DEL PROGRAMA

```

SUB DBODexacta (xmax!, v!, kd!, ka!, Os!, Oo!, Lo!, Xcritica!, ODmin!, D
SUB PonTitulo (xf1%, xf2%, yf1%, Titulo$)
SUB grafica (x!(), y!(), clr%, xf1%, yf1%, xf2%, yf2%, xl1!, yl1!, xl2!,

```

programa resuelve las ecuaciones diferenciales (flujo piston):

$$v \cdot dDBO/dx = -Kd \cdot DBO$$

$$v \cdot dOD/dx = -kd \cdot DBO + ka \cdot (ODs-OD)$$

íticamente (sol. exacta)

```

kd (1/día)="; kd
kr (1/día)="; ka
Os (mg/L)="; Os
OD (mg/L)="; Oo
v (km/día)="; v
DBOu (mg/L)="; Lo

```

```

xmax (km)="; xmax

```

```

BO(1), OD(1), x(1)

```

12

```

13, 1: PRINT "x critica", "Omin"
14, 2: PRINT "(km) (mg/L)"
15, 1: PRINT STRING$(20, "-")

```

```

DBODexacta(xmax, v, kd, ka, Os, Oo, Lo, XcE, OminE, DBO(), OD(), x())
grafica(x(), DBO(), 14, 180, 20, 510, 220, 0, 0, xmax, Lo, 0, "Demanda Bi
grafica(x(), OD(), 14, 180, 260, 510, 450, 0, 0, xmax, Os * 2, 0, "Oxigen

```

```

4
16, 1: PRINT SPACES(20):
16, 1: PRINT USING "###.#"; XcE;
";
SING "###.#"; OminE

```

```

Dexacta (xmax, v, kd, ka, Os, Oo, Lo, Xcritica, ODmin, DBO(), OD(), x())
DBOo*exp(-Kd*x/v)

```

```

Os-(Os-Oo)*Exp(-Ka*x/v)+Kd*Lo*(Exp(-Ka*x/v)-Exp(-Kd*x/v))/(Ka-Kd)
      (Streeter-Phelps)
REDIM DBO(xmax), OD(xmax), x(xmax)

max% = xmax
min% = 0

dx = 1

DBO(min%) = Lo
OD(min%) = Oo
x(min%) = 0

x = dx

FOR i% = min% + 1 TO max%
  Teta = x / v
  EKaT = EXP(-ka * Teta)
  EkdT = EXP(-kd * Teta)

  DBO(i%) = Lo * EkdT
  OD(i%) = Os - (Os - Oo) * EKaT + kd * Lo * (EKaT - EkdT) / (ka -
x(i%) = x
  x = x + dx
NEXT

Xcritica = v * LOG(ka / kd * (1 - (Os - Oo) * (ka - kd) / (kd * Lo))) /
ODmin = Os - kd / ka * Lo * EXP(-kd * Xcritica / v)

tica (x(), y(), clr%, xf1%, yf1%, xf2%, yf2%, x11, y11, x12, y12, BanClr%
Tipo% = 30583 '111011101110111

tulo xf1%, xf2%, yf1%, Titulo$

xf1%, yf1%)-(xf2%, yf2%), , 2
Clr% THEN
CLS
(x11, y11)-(x12, y12)

x12 / 2, 0)-(x12 / 2, y12), 2, , Tipo% 'lineas para dividir la
0, y12 / 2)-(x12, y12 / 2), 2, , Tipo% 'grafica en cuatro secciones

UBOUND(x)
LBOUND(x)

x(min%), y(min%)), clr%
% = min% + 1 TO max%
LINE -(x(i%), y(i%)), clr%
%

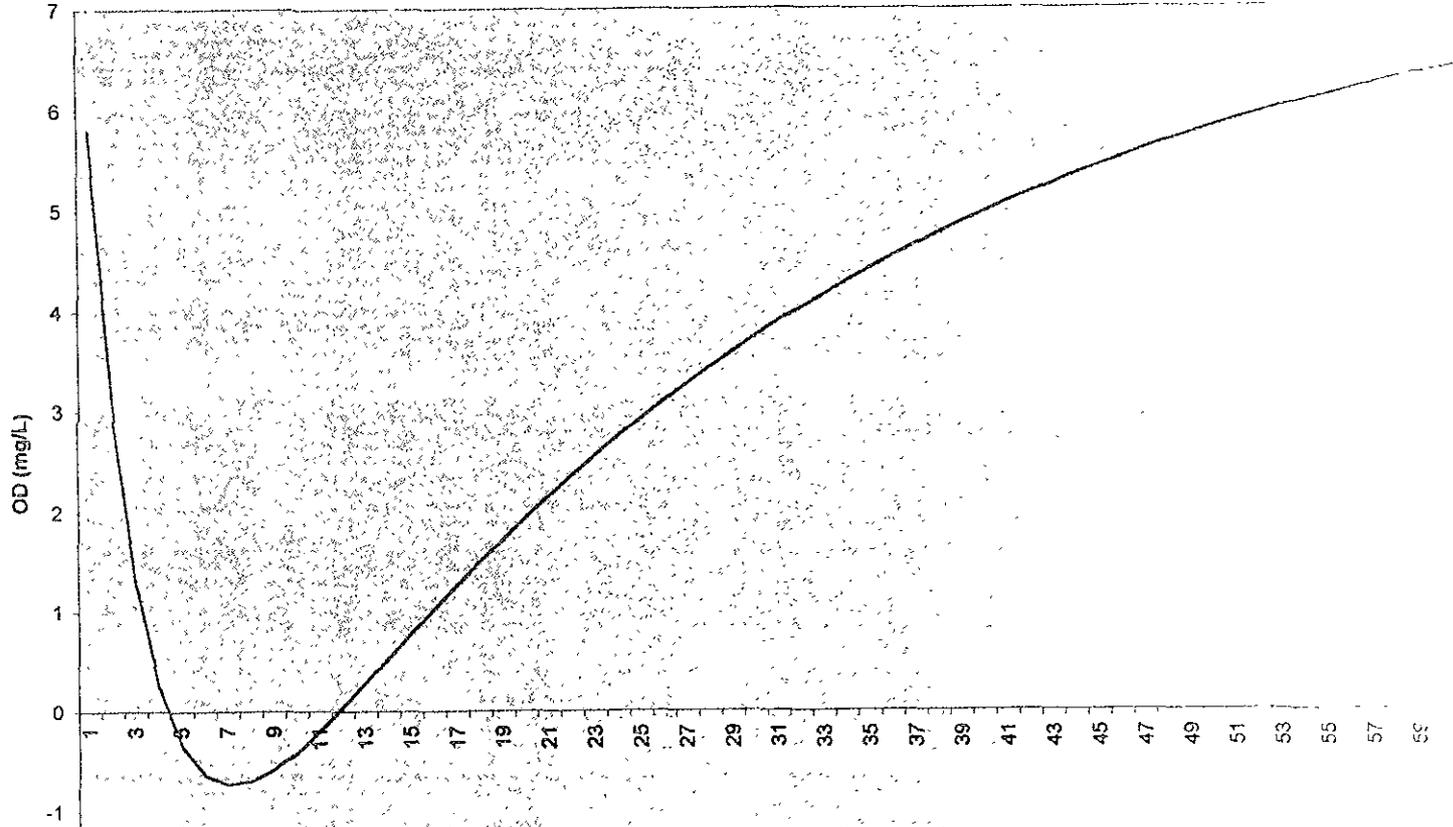
Titulo (xf1%, xf2%, yf1%, Titulo$)
el titulo, centrandolo

(xf2% - xf1%) / 8
Titulo$

```

```
T$ = SPACES(dx%)
Longi% = LEN(m$)
IF Longi% > dx% THEN
    Longi% = dx%
    m2$ = LEFT$(m$, dx%)
END IF
xt% = (dx% - Longi%) / 2 + 1
MID$(T$, xt%) = m$
IF yf1% > 15 THEN
    LOCATE yf1% \ 16, xf1% / 8 + 1
    PRINT T$;
END IF
END SUB
```

STREETER Y PHELPS



STREETER Y PHELPS

