

59  
20



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**“ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA  
DEL RIO DUERO”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A :**

**GOMEZ REYES VICTOR HUGO**



**MEXICO, D. F.**

**1987**



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 está 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.

## CONTENIDO

Página

### CAPITULO I INTRODUCCION

|     |  |   |
|-----|--|---|
| 1.1 | Problemática de la contaminación del agua.....               | 1 |
| 1.2 | Distribución de los recursos hidráulicos.....                | 1 |
| 1.3 | Grado de contaminación de aguas en las cuencas del país..... | 3 |
| 1.4 | Cuenca del río Lerma-Santiago.....                           | 4 |
| 1.5 | Justificación del estudio.....                               | 7 |

### CAPITULO II DESCRIPCION DE LA CUENCA DEL RIO DUERO

|      |                             |    |
|------|-----------------------------|----|
| 2.1  | Ubicación y límites.....    | 12 |
| 2.2  | Geología.....               | 13 |
| 2.3  | Geomorfología.....          | 13 |
| 2.4  | Clima.....                  | 14 |
| 2.5  | Temperatura.....            | 14 |
| 2.6  | Evaporación.....            | 14 |
| 2.7  | Precipitación.....          | 14 |
| 2.8  | Demografía.....             | 15 |
| 2.9  | Estructura ocupacional..... | 15 |
| 2.10 | Estructura productiva.....  | 15 |
| 2.11 | Bienestar social.....       | 16 |

### CAPITULO III EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

|     |                                |    |
|-----|--------------------------------|----|
| 3.1 | Reconocimiento de la zona..... | 25 |
| 3.2 | Localización de descargas..... | 27 |
| 3.3 | Muestreo.....                  | 28 |
| 3.4 | Análisis de laboratorio.....   | 29 |
| 3.5 | Evaluación.....                | 30 |

|  | Página |
|--|--------|
| 3.5.1 Causas y efectos de los contaminantes..... | 30     |
| 3.5.2 Diagnóstico de la calidad del agua.....    | 36     |
| 3.5.3 Índice de calidad.....                     | 43     |
| 3.5.4 Relación de absorción de sodio.....        | 47     |
| 3.6 Balance hidráulico.....                      | 48     |

CAPITULO IV  
MODELO MATEMATICO DE LA VARIACION  
DE LA CALIDAD EN CORRIENTES

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 Autopurificación del agua.....                                     | 83  |
| 4.2 Desoxigenación por acción de la materia orgánica carbonosa.....    | 85  |
| 4.3 Reoxigenación atmosférica.....                                     | 89  |
| 4.4 Balance de oxígeno disuelto.....                                   | 91  |
| 4.5 Determinación de la constante de desoxigenación...                 | 96  |
| 4.6 Determinación de la constante de reaereación.....                  | 100 |
| 4.7 Corrección por temperatura.....                                    | 101 |
| 4.8 Corrección por volumen de escurrimiento.....                       | 101 |
| 4.9 Otros fenómenos que afectan el modelo.....                         | 102 |
| 4.9.1 Efecto de la carga bental.....                                   | 103 |
| 4.9.2 Efecto de la materia nitrogenada.....                            | 105 |
| 4.9.3 Efecto de la fotosíntesis y la respiración del plancton.....     | 105 |
| 4.10 Aplicación del modelo.....  | 106 |
| 4.10.1 Determinación de la concentración de saturación.....            | 108 |
| 4.10.2 Calibración del modelo.....                                     | 109 |
| 4.10.3 Calibración del modelo para condiciones críticas (estiaje)..... | 114 |

CAPITULO V  
GRADO DE TRATAMIENTO NECESARIO PARA LAS DESCARGAS

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 5.1 Legislación..... | 130 |
|----------------------|-----|

|  | Página |
|--|--------|
| 5.1.1 Ley Federal de Aguas.....  | 130    |
| 5.1.2 Ley Federal de Protección al Ambiente.....                                   | 132    |
| 5.1.3 Reglamento para la Prevención y Control de<br>la Contaminación de Aguas..... | 133    |
| 5.1.4 Código Sanitario.....  | 135    |
| 5.1.5 Reglamento de la Ley de Obras Públicas.....                                  | 136    |
| 5.2 Medidas de atenuación.....   | 137    |
| 5.3 Procesos unitarios de tratamiento.....   | 138    |
| 5.4 Niveles de tratamiento.....  | 139    |
| 5.5 Procesos de tratamiento.....   | 141    |
| 5.5.1 Lodos activados.....   | 141    |
| 5.5.2 Discos biológicos.....   | 141    |
| 5.5.3 Zanjas de oxidación.....   | 143    |
| 5.5.4 Filtros rociadores.....  | 144    |
| 5.5.5 Lagunas de estabilización.....   | 145    |
| 5.6 Clasificación de la corriente.....   | 148    |
| 5.7 Grado de tratamiento necesario.....  | 149    |

## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 6.1 Conclusiones.....    | 171 |
| 6.2 Recomendaciones..... | 174 |
| BIBLIOGRAFIA.....        | 177 |

## INDICE DE CUADROS

| Cuadro   | Página |
|--|--------|
| 1.1 Ecurrimientos en la República Mexicana.....                                      | 8      |
| 1.2 Aguas subterráneas en la República Mexicana.....                                 | 9      |
| 1.3 Principales afluentes del río Lerma.....   | 9      |
| 2.1 Datos de población censal y futura en la cuenca del río Duero.....               | 17     |
| 2.2 Población ocupacional y económicamente activa - en la cuenca del río Duero.....  | 18     |
| 2.3 Estructura productiva en la cuenca del río Duero.                                | 19     |
| 2.4 Bienestar social en la cuenca del río Duero.....                                 | 20     |
| 3.1 Estaciones de muestreo del río Duero.....  | 49     |
| 3.2 Estación de muestreo DUE 1 Puente Etucuario. Características de calidad.....     | 51     |
| 3.3 Estación de muestreo DUE 2 Puente Gómez Farías - Características de calidad..... | 52     |
| 3.4 Estación de muestreo DUE 3 "Las Adjuntas". - Características de calidad.....     | 53     |
| 3.5 Estación de muestreo DUE 4 Lago Camécuaro. - Características de calidad.....     | 54     |
| 3.6 Estación de muestreo DUE 5 Puente El Platanal. - Características de calidad..... | 55     |
| 3.7 Estación de muestreo DUE 6 Puente Zamora-Jacona Características de calidad.....  | 56     |
| 3.8 Estación de muestreo DUE 7 Puente Jacona. - Características de calidad.....      | 57     |
| 3.9 Estación de muestreo DUE 8 Descarga a.r. Zamora. Características de calidad..... | 58     |
| 3.10 Estación de muestreo DUE 9 Dren Chavinda. Características de calidad.....       | 59     |
| 3.11 Estación de muestreo DUE 10 Dren "A". Características de calidad.....           | 60     |
| 3.12 Estación de muestreo DUE 11 Puente Estanzuela - Características de calidad..... | 61     |

| Cuadro  | Página |
|---|--------|
| 3.13 Estación de muestreo DUE 12 Puente Ingenieros<br>Características de calidad.....                       | 62     |
| 3.14 Calidad bacteriológica del agua del río Duero  | 63     |
| 3.15 Abundancia relativa (%) de grupos fitoplanctónicos en el río Duero.....                                | 64     |
| 3.16 Abundancia relativa (%) de grupos zooplanctónicos en el río Duero.....                                 | 65     |
| 3.17 Relación de especies fitoplanctónicas dominantes a través de las diferentes fechas de muestreo.....    | 66     |
| 3.18 Relación de especies zooplanctónicas dominantes a través de las diferentes fechas de muestreo.....     | 67     |
| 3.19 Densidad y estimaciones de diversidad del fitoplancton.....  | 68     |
| 3.20 Densidad y estimaciones de diversidad del zooplancton.....   | 69     |
| 3.21 Densidad bentónica del río Duero.....  | 70     |
| 3.22 Importancia relativa de los parámetros para definir el índice de calidad.....                          | 70     |
| 3.23 Calificación general según el índice de calidad y el uso del agua.....                                 | 71     |
| 3.24 Índice de calidad en las estaciones del río Duero.....   | 72     |
| 3.25 Índice de calidad para riego.....  | 73     |
| 3.26 Resumen hidráulico de aportaciones y extracciones en épocas de estiaje y muestreo en el río Duero..... | 74     |
| 4.1 Valores de saturación de oxígeno en agua dulce a nivel del mar.....                                     | 117    |
| 4.2 Factor de corrección para oxígeno de saturación a varias altitudes.....                                 | 118    |
| 4.3 Calibración del modelo de autopurificación en el río Duero.....   | 119    |

| Cuadro   | Página |
|--|--------|
| 4.4 Variación de la DBO en el río Duero. Calibración del modelo.....   | 120    |
| 4.5 Resultados del modelo en condiciones críticas (estiaje).....   | 121    |
| 4.6 Variación de la DBO en el río Duero. Condiciones críticas (estiaje).....   | 122    |
| 5.1 Valores máximos permisibles para las descargas de aguas residuales (tabla No. 1 del artículo 13).....  | 153    |
| 5.2 Clasificación de las aguas de los cuerpos receptores superficiales en función de sus usos y características de calidad (Tabla No. 2 del artículo 24). .... | 154    |
| 5.3 Valores máximos permisibles de sustancias tóxicas en los cuerpos receptores (Tabla No. 3 del artículo 24).....   | 157    |
| 5.4 Procesos unitarios y procesos de tratamiento-empleados en la remoción de los principales contaminantes del agua residual.....                              | 158    |
| 5.5 Sumario de las características del efluente de varias alternativas de tratamiento.....   | 159    |
| 5.6 Clasificación del río Duero.....   | 160    |
| 5.7 Resultados del modelo para el 60, 80 y 90% de remoción.....  | 162    |
| 5.8 Variación de la DBO en el río Duero para el 60, 80 y 90% de remoción.....  | 164    |

## INDICE DE FIGURAS

| Figura   | Página |
|--|--------|
| 1.1 Localización de las cuencas de primer orden.....   | 10     |
| 1.2 Cuenca del río Lerma.....  | 11     |
| 2.1 Cuenca del río Duero.....  | 21     |
| 2.2 Perfil del río Duero.....  | 22     |
| 2.3 Temperatura mensual en el río Duero (Estación ---<br>Zamora, período 1921-1970).....   | 23     |
| 2.4 Evaporaciones mensuales en el río Duero (Estación<br>Zamora, período 1956-1958).....   | 23     |
| 2.5 Precipitación mensual en el río Duero. (Estación-<br>Zamora, período 1921-1970).....   | 24     |
| 3.1 Cuenca del río Duero. Esquema general de funciona<br>miento.....   | 75     |
| 3.2 Descarga de aguas residuales de Chilchota.....   | 76     |
| 3.3 Descarga de aguas residuales de Tangancicuaro....  | 77     |
| 3.4 Descarga de aguas residuales de Zamora.....  | 78     |
| 3.5 Descarga de aguas residuales de Jacona.....  | 79     |
| 3.6 Croquis de localización de las estaciones de mues<br>treo del río Duero.....   | 80     |
| 3.7 Diagrama para definir la calidad del agua para --<br>riego agrícola.....   | 81     |
| 3.8 Esquema de distribución hidráulica en el río Duero   | 82     |
| 4.1 Progreso de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO)<br>a 9, 20 y 30°C.....  | 123    |
| 4.2 Primera etapa de la demanda bioquímica de oxígeno  | 123    |
| 4.3 Balance de oxígeno disuelto.....   | 124    |
| 4.4 Valores de k para magnitudes calculadas de $\sum y / \sum ty$<br>y valores de $\sum y / L$ para estos valores de k, para -<br>una secuencia de cinco días..... | 125    |
| 4.5 Datos de calidad para la calibración del modelo --<br>del río Duero.....   | 126    |

| Figura  | Página |
|---|--------|
| 4.6 Variación del OD en el río Duero. Calibración del modelo.....             | 127    |
| 4.7 Datos de calidad para condiciones críticas (estiaje) en el río Duero..... | 128    |
| 4.8 Variación del OD en el río Duero. Condiciones críticas (estiaje).....     | 129    |
| 5.1 Opciones en procesos de tratamiento.....                                  | 165    |
| 5.2 Esquema del proceso de lodos activados convencional.....                  | 166    |
| 5.3 Esquema del proceso de discos biológicos y módulo tipo.....               | 167    |
| 5.4 Esquemas comunes del proceso de zanjas de oxidación.....                  | 168    |
| 5.5 Corte esquemático de un filtro rociador.....                              | 169    |
| 5.6 Variación de OD en el río Duero para el 60, 80 y 90% de remoción.....     | 170    |

## CAPITULO I

### INTRODUCCION

#### 1.1 PROBLEMATICA DE LA CONTAMINACION DEL AGUA.

El agua de las corrientes superficiales constituye uno de los componentes más importantes del ambiente. Es profusamente utilizada como abastecimiento de agua potable, en procesos industriales, riego agrícola, recreación, pesca, generación de energía eléctrica, navegación, y como transporte de desechos líquidos y sólidos. Es este último uso el que en ocasiones impide o limita todos los anteriores, ya que altera la calidad del agua en el cuerpo receptor.

A consecuencia del crecimiento demográfico y del desarrollo industrial de México, se ha suscitado un aumento de volúmenes de aguas residuales que al ser vertidas sin previo tratamiento a los cuerpos receptores han ocasionado problemas ecológicos en distintos grados.

Lo anterior obliga a adoptar medidas y métodos para prevenir y controlar la contaminación del agua de los cuerpos receptores, ya que de lo contrario, en pocos años las aguas que son transportadas por estos cuerpos, no podrán ser utilizadas para los usos que requiere el desarrollo del país.

#### 1.2 DISTRIBUCION DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS.

Los recursos hidráulicos en México están constituidos por ríos, lagos, lagunas, yacimientos subterráneos y las lluvias. El agua sufre un proceso conocido como "ciclo hidrológico" que comprende las fases de evaporación-condensación-lluvia-escurremienta-evaporación; de ahí que se le considere como un recurso perma

nente, ya que, gracias la ciclo mencionado, su volumen sobre el planeta es más o menos constante.

Por los yacimientos de agua hacia donde desembocan los ríos, estos se agrupan en vertientes que son: la del Pacífico, la del Golfo de México y la Vertiente Interna (llamada así porque los ríos desembocan en lagos y lagunas interiores). En el cuadro 1.1 se muestra el volumen de las principales corrientes y las vertientes a las que corresponden.

Por lo que respecta a las aguas subterráneas del país, su cuantificación se muestra en el cuadro 1.2.

En cuanto a las lluvias, el volumen medio anual en el país es de 1.5 billones de m<sup>3</sup>, y la precipitación media anual es de 780 mm. siendo muy irregular la distribución de las lluvias en el territorio mexicano.

Cabe mencionar que la distribución de los recursos hidráulicos en México no guarda una relación directa con la localización de los asentamientos humanos y de las actividades económicas. Así, el Sureste, con sólo el 15% del área del país y el 12% de la población, cuenta con el 42% de los escurrimientos fluviales; mientras que la Altiplanicie del Centro y del Norte, que ocupan el 36% de la superficie y da cabida al 60% de la población cuenta únicamente con el 4% de los escurrimientos.

Así mismo, a pesar de que el consumo de agua es relativamente bajo respecto a la disponibilidad potencial renovable, en algunas regiones el consumo es de tal magnitud que supera a la disponibilidad. Tal es el caso del Valle de México, que demanda enormes volúmenes de agua por las grandes concentraciones urbanas e industriales que hay en el área metropolitana de la ciudad de México.

### 1.3 GRADO DE CONTAMINACION DE AGUAS EN LAS CUENCAS DEL PAIS.

La demanda creciente de agua dulce y su disponibilidad restringida obliga a tomar medidas para manejar el recurso eficientemente y utilizar técnicas para incrementar su disponibilidad. Sin embargo, las apreciaciones más optimistas sobre la existencia del agua y su utilización se ven restringidas por los efectos nocivos de la contaminación. Los desechos de las ciudades y las industrias, así como los residuos tóxicos de los fertilizantes y herbicidas en el campo, tienen una incidencia peligrosa -- sobre la salud humana, la flora y la fauna, de tal manera que se requieren medidas que ayuden a prevenir y a remediar los casos -- en que la contaminación ya haya hecho sus efectos en las aguas -- nacionales.

Lo anterior ocasionó la necesidad de conocer el grado de -- contaminación que presentan las aguas en el país, con el objeto de avocarse en primer lugar a aquellas cuencas que por sus características particulares presentan mayores problemas de contaminación.

A continuación se enlistan las once cuencas (llamadas de -- primer orden) que requieren una atención inmediata debido al --- alto índice de contaminación, el cual se determinó en base a indicadores físicos, sociales, económicos y de contaminación.

1. Cuenca del río Pánuco.
2. Cuenca del río Lerma-Santiago.
3. Cuenca del río Balsas.
4. Cuenca del río Blanco.
5. Cuenca del río Guayalejo.
6. Cuenca del río San Juan.
7. Cuenca del río Culiacán.
8. Cuenca del río Fuerte.
9. Cuenca del río Coahuayana.

10. Cuenca del río Nazas.
11. Cuenca del río Conchos.

Estas cuencas representan el 28% de la superficie del país, el 59% de la población total, el 77% del valor bruto de la producción industrial, el 13% del volumen de escurrimiento en los ríos del país, el 52% de la superficie bajo riego y el 54% de la carga orgánica del país. En la figura 1.1 se muestra la localización de las cuencas de primer orden.

Aún cuando la cuenca del río Lerma-Santiago ocupa el segundo lugar, es la que mayor atención requiere, ya que sus fuentes de contaminación se encuentran diseminadas a lo largo de la cuenca, lo que ocasiona que las poblaciones y núcleos industriales se afecten unos a otros. Caso que no se presenta en misma magnitud en el río Pánuco, ya que en este, las principales fuentes de contaminación se encuentran en los puntos extremos de su cuenca.

#### 1.4 CUENCA DEL RIO LERMA-SANTIAGO.

El sistema Lerma-Chapala-Santiago posee un recorrido a lo largo del colector general desde los orígenes del Lerma hasta la desembocadura del Santiago en el Pacífico, de 927 Km., y un área total de 125,370 Km<sup>2</sup>, es la más extensa de la República, correspondiendo el 37% a la cuenca del Lerma hasta su desembocadura en el lago de Chapala y el 63% a la cuenca del río Santiago.

La cuenca del río Lerma-Santiago tiene una carga orgánica total de 134'784,687 kg/año, la cual se encuentra distribuida -- de la siguiente manera:

| LOCALIDAD             | CARGA ORGANICA<br>COMO DBO EN<br>KG/AÑO | % DE DBO<br>RESPECTO<br>A LA CARGA<br>ORGANICA<br>TOTAL | % DE DBO<br>DEBIDA<br>A LA<br>POBLACION | % DE DBO<br>DEBIDA<br>A LA<br>INDUSTRIA |
|-----------------------|---|---|---|---|
| Guadalajara           | 29'431,316                              | 22  | 72                                      | 28                                      |
| Tepic                 | 18'494,037                              | 14  | 5                                       | 95                                      |
| Poncitlán             | 14'683,220                              | 11  | 1                                       | 99                                      |
| Salamanca             | 11'595,956                              | 9   | 7                                       | 93                                      |
| Zacapu                | 10'895,214                              | 8   | 1                                       | 99                                      |
| Toluca                | 10'870,256                              | 8   | 18                                      | 82                                      |
| Aguascalientes        | 6'829,284                               | 5   | 43                                      | 57                                      |
| León                  | 5'629,690                               | 4   | 86                                      | 14                                      |
| Celaya                | 4'013,789                               | 3   | 31                                      | 69                                      |
| Querétaro             | 3'580,824                               | 2.6   | 46                                      | 54                                      |
| Tequila               | 3'543,867                               | 2.6   | 4                                       | 96                                      |
| Morelia               | 3'496,326                               | 2.5   | 77                                      | 23                                      |
| Zapopan               | 3'030,780                               | 2.2   | 53                                      | 47                                      |
| Irapuato              | 2'792,208                               | 2.0   | 65                                      | 35                                      |
| Lagos de<br>Moreno    | 2'590,898                               | 1.9   | 19                                      | 81                                      |
| Tlaquepaque           | 1'374,125                               | 1.0   | 91                                      | 9                                       |
| Salvatierra           | 654,705                                 | 0.5   | 78                                      | 22                                      |
| Lerma                 | 625,708                                 | 0.5   | 25                                      | 75                                      |
| Santiago<br>Izcuintla | 349,958                                 | 0.1   | 86                                      | 14                                      |
| Pénjamo               | 302,526                                 | 0.1   | 54                                      | 46                                      |

El río Lerma es uno de los más importantes del país tanto por su ubicación y desarrollo como por los diversos usos a que son sometidas sus aguas durante su recorrido. Entre estos se cuentan: abastecimiento de agua a la ciudad de México desde las lagunas de Almoloya que dan origen a este río; riego en diversos puntos de su longitud; generación de energía eléctrica en Tepuxtepec; pesca en los embalses Alzate, Tepuxtepec, Solís y Chapala y a lo largo del río, recreación en diversos puntos; arrastre y

dilución de aguas residuales y abastecimiento a la ciudad de Guadalajara desde el lago de Chapala, formado por este río.

Sin embargo, su paso por diversos desarrollos humanos y zonas industriales, que descargan sus aguas residuales sin tratamiento, hacen de este río uno de los más contaminados del país. Por ejemplo, en el tramo del inicio del río a la presa J. Antonio Alzate, se presenta una zona de alta contaminación originada por la descarga de aguas residuales provenientes de la ciudad de Toluca y su zona industrial.

Otra zona de alta contaminación se presenta en las inmediaciones de la ciudad de Salamanca, en donde recibe las descargas de: "Arroyo Feo" que conduce las aguas residuales de Guanos y -- Fertilizantes, Negromex, Montrose y Lerma Industrial; aguas residuales de la refinería de Pémex y la planta termoeléctrica y las aguas residuales municipales. Las descargas mencionadas producen un abatimiento total del oxígeno disuelto en una longitud aproximada de 70 Km. En ese tramo el río presenta un color negro, las grasas y aceites manchan ambas márgenes del río, no --- existe vida acuática útil y si algún pez sobrevive su sabor a petróleo identifica la zona donde fue capturado.

En las cercanías de la presa Markazuza, grandes cantidades de espuma y materia flotante son retiradas de las aguas del río y quemadas en una fosa lateral para impedir que afecten los cultivos en cuyo riego son utilizadas. En esta presa el agua recibe una reaereación recuperando más rápidamente una calidad aceptable. En el tramo que circunda a la población de la Piedad Cabañas, Michoacán, se advierte de nuevo una alza en la concentración de materia orgánica, producto de las descargas de aguas residuales provenientes de las actividades porcinas de la localidad, lo cual nuevamente reduce en forma considerable el contenido de oxígeno disuelto en el agua, presentándose además una fuerte proliferación de lirio acuático que impide la transferencia -

de oxígeno del aire. En la cascada denominada "El Salto" se obtiene una recuperación en el contenido de oxígeno, el cual llega a valores del 70% de saturación. Antes de su descarga al lago de Chapala, recibe la descarga de La Barca y disminuye su velocidad por la acción de la presa Maltaraña por lo que se presenta una alta proliferación de lirio acuático que cubre totalmente el río en sus últimos 8 Km. La descarga de materia bioestimulante al lago de Chapala a través del río Lerma contribuye a la eutricación del lago. En la figura 1.2 se muestra la cuenca del río Lerma.

Los principales afluentes del río Lerma se muestran en el cuadro 1.3.

#### 1.5 JUSTIFICACION DEL ESTUDIO.

Del cuadro 1.3 se observa que los afluentes del Lerma de mayor cuenca son los ríos Laja, Turbio, Guanajuato, Duero y Angulo. Sin embargo, debido a los aprovechamientos que se hace de los tres primeros su volumen de aportación al Lerma se ha reducido considerablemente; por ejemplo, el río Turbio en su confluencia con el Lerma, en época de estiaje se encuentra prácticamente seco; mientras que los ríos Duero y Angulo son los afluentes izquierdos más importantes, tanto por su volumen de aportación como por su ubicación.

La evaluación de la calidad de las aguas del río Duero adquiere mayor importancia tanto por los usos a que se le destina como por ser de los más altos aportadores del río Lerma en la parte más cercana a la desembocadura en el lago de Chapala, cuya salida es el río Santiago que sirve como fuente de abastecimiento a la ciudad de Guadalajara, considerada la segunda ciudad en el país por su concentración de población.

CUADRO 1.1

## ESCURRIMIENTO EN LA REPUBLICA MEXICANA

|   | ESCURRIMIENTO,<br>millones de m <sup>3</sup> | % DEL<br>TOTAL |
|---|--|----------------|
| <u>Vertiente del Golfo</u>                    |  |                |
| Bravo   | 5,810  | 1.6            |
| Pánuco  | 17,300                                       | 4.7            |
| Tecolutla                                     | 7,529  | 2.1            |
| Papaloapan                                    | 30,175                                       | 8.3            |
| Coatzacoalcos                                 | 22,395                                       | 6.1            |
| Sistema Grijalva-Usumacinta                   | 105,200                                      | 28.7           |
| Tonalá  | 5,875  | 1.6            |
| Otras menores                                 | 41,417                                       | 11.3           |
| Sub-total:                                    | 235,701                                      | 64.4           |
| <u>Vertiente del Pacífico</u>                 |  |                |
| Colorado                                      | 1,850  | 0.5            |
| Yaqui   | 2,790  | 0.8            |
| Fuerte  | 5,933  | 1.6            |
| Culiacán                                      | 3,357  | 0.9            |
| Lerma-Santiago                                | 11,457                                       | 3.1            |
| Ameca   | 3,599  | 1.0            |
| Balsas  | 13,863                                       | 3.8            |
| Papagayo                                      | 5,634  | 1.5            |
| Ometepec                                      | 4,459  | 1.2            |
| Verde   | 6,173  | 1.7            |
| Otras menores                                 | 67,450                                       | 18.5           |
| Sub-total:                                    | 126,565                                      | 34.6           |
| <u>Vertiente Interna</u>                      |  |                |
| Río Nazas                                     | 1,302  | 0.4            |
| Otras menores (incluyendo lagos<br>y lagunas) | 2,364  | 0.6            |
| Sub-total:                                    | 3,666  | 1.0            |
| Total en el país:                             | <u>365,932</u>                               | <u>100.0</u>   |

CUADRO 1.2

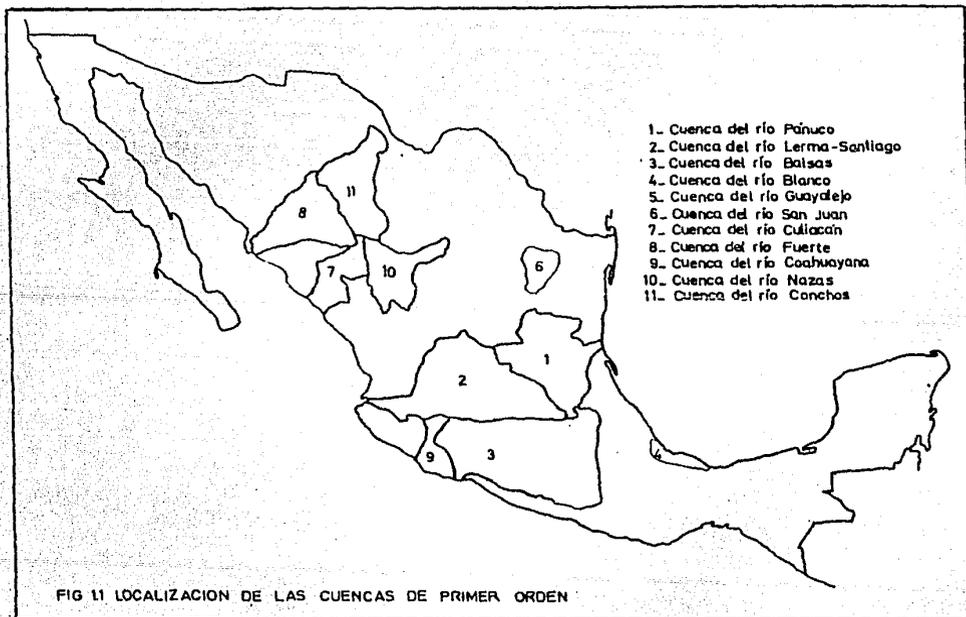
AGUAS SUBTERRANEAS EN LA REPUBLICA MEXICANA

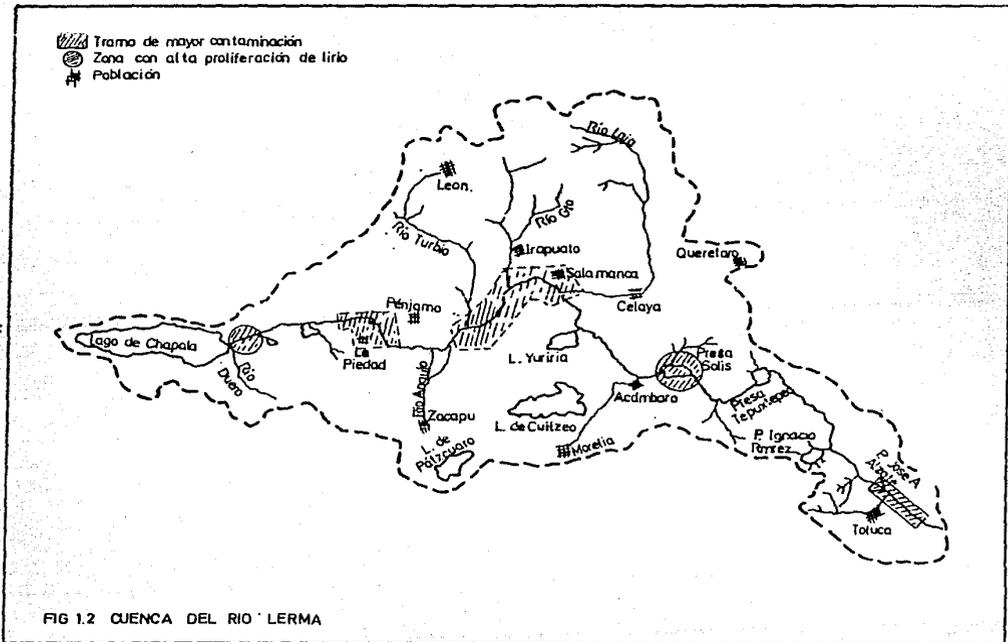
|                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| Total explotable | 255 Km <sup>3</sup> /anuales |
| Aprovechables    | 28 Km <sup>3</sup> /anuales  |

CUADRO 1.3

PRINCIPALES AFLUENTES DEL RIO LERMA

| CORRIENTE             | TIPO DE AFLUENTE | AREA TOTAL DEL AFLUENTE (Km <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|------------------|--|
| Río Otzolotepec       | Derecho          | 212  |
| Río Tejalpa           | Izquierdo        | 275  |
| Río La Gavia          | Izquierdo        | 554  |
| Río El Pescado        | Derecho          | 589  |
| Río Jaltepec          | Izquierdo        | 411  |
| Arroyo Atotonilco     | Derecho          | 133  |
| Río Chiquito          | Derecho          | 206  |
| Río Tlalpujahuá       | Izquierdo        | 492  |
| Arroyo Cachivi        | Izquierdo        | 669  |
| Arroyo Tarandacuao    | Izquierdo        | 277  |
| Río Tigre o Coroneo   | Derecho          | 720  |
| Arroyo Hondo          | Derecho          | 1,006                                      |
| Río La Laja           | Derecho          | 9,679                                      |
| Arroyo Tamascatio     | Derecho          | 435  |
| Río Guanajuato        | Derecho          | 3,303                                      |
| Río Turbio            | Derecho          | 4,489                                      |
| Río Janamúato         | Izquierdo        | 622  |
| Río Angulo            | Izquierdo        | 2,079                                      |
| Arroyo Los Ocotes     | Derecho          | 319  |
| Río Zináparo          | Izquierdo        | 154  |
| Río Andamácuaro       | Derecho          | 138  |
| Río Huáscato          | Derecho          | 457  |
| Arroyo Quiringuícharo | Izquierdo        | 909  |
| Arroyo Tejo Tarango   | Derecho          | 200  |
| Río Duero             | Izquierdo        | 2,690                                      |





## CAPITULO II

### DESCRIPCION DE LA CUENCA DEL RIO DUERO

#### 2.1 UBICACION Y LIMITES.

El río Duero nace en Carapan por la unión de los manantiales Otácuaro, Ojo Chico, Cunio, Cunio Chico, Echingario, Uren y Bejar, en este tramo se le conoce como río Chilchota, el cual pasa por los pueblos de Tacuaro, Huancito, Santo Tomás, Acahuen, Chilchota, etc., hasta que se une por la margen izquierda del río Pejo, a unos 3 Kms. al NE de la ciudad de Tangancícuaro de Arista. A 2 Kms. aguas abajo de esta confluencia el río Chilchota recibe por su margen derecha las aguas del río Tlazazalca, dicha confluencia ocurre en un punto que queda a unos 14 Kms. al SE de Zamora y da lugar así al río Duero.

La cuenca del río Duero es de forma alargada de orientación SE - NW de forma irregular y mide aproximadamente 2,690 Kms<sup>2</sup>.

Por el sur la cuenca queda limitada por el tramo del parteaguas general del Lerma (tramo VI); por el SW por una buena parte del parteaguas general del Lerma clasificado como VII; por el este, el noreste y el norte, la cuenca está configurada por una línea irregular que arranca del cerro de la Virgen (vértice formado por los tramos V y VI del parteaguas general del Lerma) y sigue rumbo al norte incluyendo los cerros de El Tecolote, el Tula y de Enmedio. Después, esta línea se desvía hacia el NW y todavía hay a lo largo de ella las eminencias Jemanducuaró, El Fraile, Cerro Blanco, Ecuandureo, Cerro del Encinal y Cerro de las Trompetas. Luego, el parteaguas baja directamente hacia el punto de unión del Duero con el Lerma.

Geográficamente la cuenca abarca desde los 19°42' a los - -

20°19' de latitud norte y desde los 101°55' a los 102°46' de longitud oeste. Toda ella queda situada dentro del estado de Michoacán y en su interior existen varias ciudades importantes como Zamora, Purépero, Chilchota y Tangancicuaro. En la figura 2.1 se muestra la localización de la cuenca del río Duero.

## 2.2 GEOLOGIA.

La cuenca del río Duero pertenece a la era Cenozoica Superior Clástico y Volcánico. Su origen está estrechamente ligado con el eje neo-volcánico, que constituye el apoyo sobre el cual se encuentra el lindero sur de la región hidrológica número 12, el cual se formó en la era Mezozoica.

En su mayor parte el suelo está constituido por rocas ígneas efusivas de la era Terciaria, las cuales están representadas por andesitas, riolitas y basaltos. Las rocas basálticas corresponden a dos diferentes épocas de aparición y constituyen la mayor parte de los aparatos volcánicos de la cuenca en estudio.

La clasificación de los suelos establece un 70% de Chernozem o negro y el 30% restante de suelos pudzólicos, encontrándose estos últimos en la parte sureste de la cuenca. En la llamada clasificación moderna de los suelos, la cuenca presenta en la totalidad de su área un suelo de Luvisols Crómico.

## 2.3 GEOMORFOLOGIA.

La cuenca del río Duero se clasifica como de pendiente de plana a suavemente ondulada, su perfil presenta una zona de pendiente fuerte al principio del río, especialmente un desnivel de 130 m. en aproximadamente 9 Kms. el cual es aprovechado para generar energía eléctrica en la planta "El Platanal". En la figura 2.2 se muestra el perfil del río Duero.

## 2.4 CLIMA.

La clasificación climatológica en la cuenca del río Duero - según Thornthwaite corresponde a un  $CiB_{1a}'$  en un 80% y un  $CiB_{2a}'$  en un 20%. La primera corresponde a un clima semiseco semicálido sin estación invernal bien definida y la segunda es similar - pero templado en vez de semicálido.

## 2.5 TEMPERATURA.

La estación Zamora ubicada en la ciudad del mismo nombre es la representativa climatológicamente para esta cuenca. Las mediciones de la temperatura efectuadas durante un período de 1921 a 1970 presentan un valor medio anual de 20.7°C con la máxima en el mes de mayo con 24.1°C y la mínima en enero con 16.9°C. Una curva con los valores medios, máximos y mínimos durante el período anteriormente mencionado se presenta en la figura 2.3.

## 2.6 EVAPORACION.

La evaporación anual promedio de la cuenca es de 2,078.3 mm. en un periodo de medición de 1956 a 1958 en la estación Zamora. Una gráfica mostrando las variaciones máximas, medias y mínimas mensuales se presenta en la figura 2.4.

## 2.7 PRECIPITACION.

La distribución anual de las lluvias en la estación Zamora presenta una curva normal bien definida. Su promedio anual de precipitación medido durante el período 1921 a 1970 es de 760.3 mm. Es indudable que existe una variación anual por estaciones con los siguientes promedios: período de lluvias (junio a septiembre) con 615 mm. y período de secas (octubre a mayo) con 145.3 mm. Las variaciones mensuales de la precipitación promedio, máximas y mínimas, se presentan en la figura 2.5.

## 2.8 DEMOGRAFIA.

En la cuenca del río Duero quedan comprendidos ocho municipios con sus cabeceras municipales y principal población ubicada cerca del cauce, a excepción de Tlazazalca y Chavinda, pero que también inciden directamente sobre la calidad del agua. Las - - fracciones del área de algunos municipios que caen fuera de la - - cuenca se localizan en sierra o parte montañosa, por lo que se - - considera que todos los habitantes del municipio inciden en la - - cuenca.

Esta tiene un total actual de 244,734 habitantes (censo 1980) con tres poblaciones sobresalientes que son: Zamora con el 46% - de la población, Tangancicuaro con el 13% y Jacona con el 15%. - Estas tres poblaciones cubren el 74% del total de los habitantes y se ubican cercanas al cauce principal. La proyección de la población realizada mediante el método geométrico indica que para el año 2000 la cuenca tendrá 336,376 habitantes y para el 2010 - serán 382,197 habitantes. Los datos de la población censal y fu tura para cada uno de los municipios integrantes se presenta en el cuadro 2.1.

## 2.9 ESTRUCTURA OCUPACIONAL.

Por lo que respecta a la estructura ocupacional, se observa que sólo el 31% de la población es económicamente activa, asimis mo, el porcentaje del personal empleado es el doble al del traba jador por su cuenta. Los valores por municipio de la estructura ocupacional se presentan en el cuadro 2.2.

## 2.10 ESTRUCTURA PRODUCTIVA.

La actividad productiva que predomina en la región es la - - agricultura, mientras que el bajo porcentaje (8%) de la indus - -

tria manufacturera indica la necesidad de una mayor industrialización agrícola. Los valores por municipio de la estructura productiva se presentan en el cuadro 2.3.

#### 2.11 BIENESTAR SOCIAL.

Dentro de los rubros de mayor importancia en lo respectivo a bienestar social encontramos que el 99% cuenta con vivienda, el 76% dispone de agua entubada y el 44% tiene drenaje. Sin embargo, un aspecto importante es que el 20% de la población es -- analfabeta, es decir uno de cada cinco individuos no sabe leer -- ni escribir. Los valores por municipio y los porcentajes específicos se presentan en el cuadro 2.4.

CUADRO 2.1

## DATOS DE POBLACION CENSAL Y FUTURA EN LA CUENCA DEL RIO DUERO

| MUNICIPIO        | AÑO 1970       | AÑO 1980       | AÑO 2000       | AÑO 2010       | % DEL TOTAL |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| Briseñas de Mat. | 7,454          | 8,487          | 10,553         | 11,586         | 3           |
| Chavinda         | 10,980         | 12,354         | 15,102         | 16,476         | 5           |
| Chilchota        | 17,363         | 17,620         | 18,134         | 18,391         | 7           |
| Ixtlán           | 13,897         | 14,870         | 16,816         | 17,789         | 6           |
| Jacona           | 26,078         | 35,247         | 53,585         | 62,754         | 15          |
| Tangancícuaro    | 29,528         | 30,947         | 33,785         | 35,204         | 13          |
| Tlazazalco       | 10,670         | 11,735         | 13,865         | 14,930         | 5           |
| Zamora           | 82,943         | 113,474        | 174,536        | 205,067        | 46          |
| TOTAL:           | <u>198,913</u> | <u>244,734</u> | <u>336,376</u> | <u>382,197</u> | <u>100</u>  |

CUADRO 2.2

POBLACION OCUPACIONAL Y ECONOMICAMENTE ACTIVA  
EN LA CUENCA DEL RIO DUERO

| MUNICIPIO        | PATRON O EMPRESARIO | EMPLEADO OBRERO O PEON | MIEMBRO DE UNA COOPERATIVA DE PRODUCCION | TRABAJADOR POR SU CUENTA | TRABAJADOR NO REMUNERADO | NO ESPECIFICADO | TOTAL         |
|------------------|---------------------|------------------------|--|--------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| Briseñas de Mat. | 149                 | 713                    | 39                                       | 688                      | 182                      | 761             | 2,532         |
| Chavinda         | 172                 | 1,002                  | 37                                       | 893                      | 329                      | 1,051           | 3,484         |
| Chilchota        | 142                 | 1,295                  | 43                                       | 2,467                    | 580                      | 1,658           | 6,185         |
| Ixtlán           | 293                 | 1,588                  | 54                                       | 1,345                    | 329                      | 951             | 4,560         |
| Jacona           | 393                 | 5,639                  | 202                                      | 1,477                    | 376                      | 1,475           | 9,522         |
| Tangancícuaro    | 446                 | 2,840                  | 68                                       | 3,134                    | 928                      | 2,710           | 10,126        |
| Tlazazalco       | 77                  | 643                    | 19                                       | 1,935                    | 529                      | 716             | 3,919         |
| Zamora           | 2,494               | 16,572                 | 335                                      | 4,988                    | 1,876                    | 9,947           | 36,212        |
| TOTAL:           | <u>4,146</u>        | <u>30,292</u>          | <u>797</u>                               | <u>16,927</u>            | <u>5,129</u>             | <u>19,229</u>   | <u>76,540</u> |

CUADRO 2.3

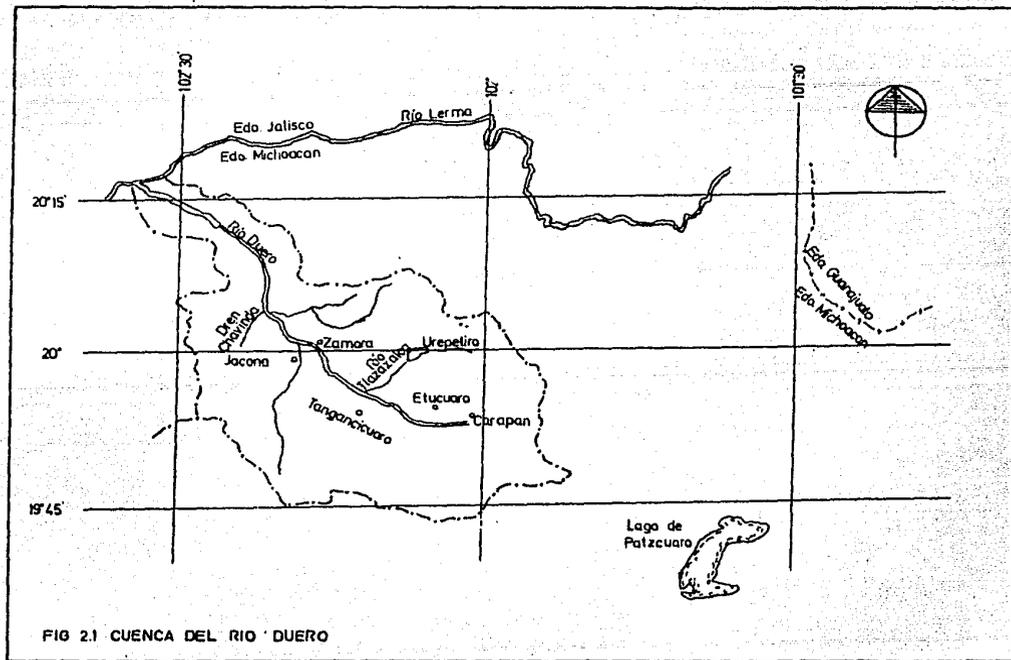
ESTRUCTURA PRODUCTIVA EN LA CUENCA DEL RIO DUERO

| MUNICIPIO         | AGRICULT.<br>GANADERIA<br>CAZA, ETC. | INDUSTRIA<br>MANUFACTU<br>RERA. | CONSTRUC<br>CION. | COMERCIO<br>MAYOR Y<br>MENOR | TRANSPORTE<br>Y ALMACENA<br>MIENTO. | ESTABLEC<br>MIENTOS<br>FINANCIE<br>ROS. | SERVI<br>CIOS<br>COMUNA<br>LES. | ACTIVIDA<br>DES INSU<br>FICIENTE<br>MENTE ES<br>PECIFICA<br>DAS. | TOTAL  |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------------|--|--------|
| Brisefias de Mat. | 1,227                                | 151                             | 59                | 106                          | 46                                  | 27                                      | 81                              | 834  | 2,531  |
| Chavinda          | 1,875                                | 109                             | 140               | 204                          | 62                                  | 7                                       | 210                             | 876  | 3,483  |
| Chilchota         | 2,212                                | 1,113                           | 144               | 353                          | 82                                  | 14                                      | 428                             | 1,821  | 6,157  |
| Ixtlán            | 2,336                                | 162                             | 126               | 167                          | 73                                  | 7                                       | 116                             | 1,270  | 4,557  |
| Jacona            | 4,048                                | 840                             | 431               | 916                          | 289                                 | 80                                      | 595                             | 2,300  | 9,499  |
| Tangancícuaro     | 4,456                                | 1,005                           | 265               | 563                          | 242                                 | 21                                      | 502                             | 3,047  | 10,101 |
| Tlazazalco        | 2,511                                | 48                              | 68                | 135                          | 26                                  | 8                                       | 140                             | 981  | 3,917  |
| Zamora            | 8,932                                | 3,020                           | 2,057             | 4,778                        | 1,248                               | 665                                     | 4,524                           | 10,942   | 36,166 |
| TOTAL:            | 27,897                               | 6,448                           | 3,290             | 7,222                        | 2,068                               | 829                                     | 6,596                           | 22,071   | 76,421 |
| §                 | 37                                   | 8                               | 4                 | 9                            | 3                                   | 1                                       | 9                               | 29   |        |

CUADRO 2.4

BIENESTAR SOCIAL EN LA CUENCA DEL RIO DUERO

| MUNICIPIO        | TOTAL DE VIVIENDAS | OCUPANTES | VIVIENDAS QUE DISPO-<br>NEN DE AGUA<br>ENTUBADA. | VIVIENDAS<br>CONECTADAS<br>AL DRENAJE<br>PUBLICO. | ANALFABETAS |           |        |
|------------------|--------------------|-----------|--|---|-------------|-----------|--------|
|                  |                    |           |  |   | MAYORES     | 6-14 AÑOS | TOTAL  |
| Briseñas de Mat. | 1,489              | 8,386     | 987  | 44  | 1,097       | 623       | 1,720  |
| Chavinda         | 2,201              | 12,307    | 1,905  | 1,077   | 1,487       | 1,054     | 2,541  |
| Chilchota        | 3,039              | 17,578    | 2,176  | 507   | 2,889       | 1,398     | 4,287  |
| Ixtlán           | 2,608              | 14,848    | 1,814  | 148   | 2,294       | 1,520     | 3,814  |
| Jacona           | 5,953              | 35,028    | 4,406  | 3,157   | 5,313       | 2,934     | 8,247  |
| Tangancícuaro    | 5,494              | 30,777    | 3,447  | 2,017   | 4,659       | 3,120     | 7,779  |
| Tlazazalco       | 2,074              | 11,727    | 1,658  | 544   | 1,270       | 1,061     | 2,331  |
| Zamora           | 20,544             | 112,155   | 16,504   | 13,665  | 11,444      | 8,302     | 19,746 |
| TOTAL:           | 43,402             | 242,806   | 32,897   | 21,159  | 30,453      | 20,012    | 50,465 |
| §                |                    | 99        | 76   | 44  |             |           | 20     |



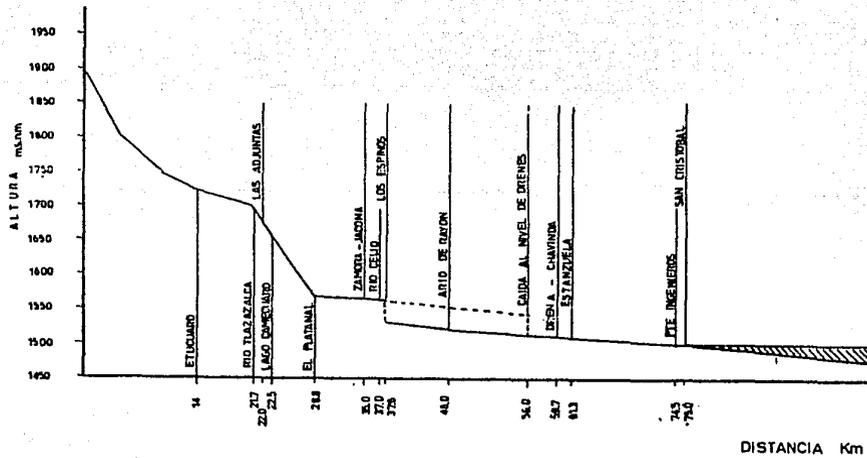


FIG. 2.2 PERFIL DEL RIO DUERO

FIG 2.3. TEMPERATURAS MENSUALES EN EL RIO DUERO  
(Est. Zamora, periodo 1921-1970)

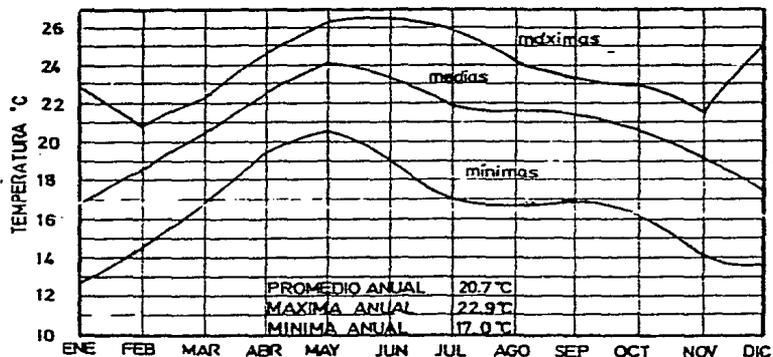


FIG 2.4. EVAPORACIONES MENSUALES EN EL RIO DUERO  
(Est. Zamora, periodo 1956-1958)

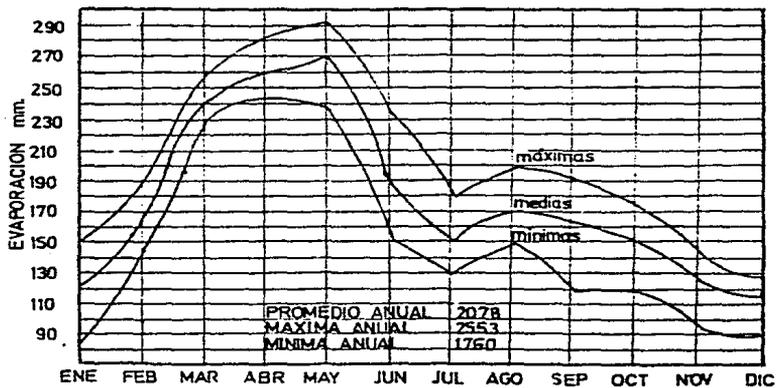
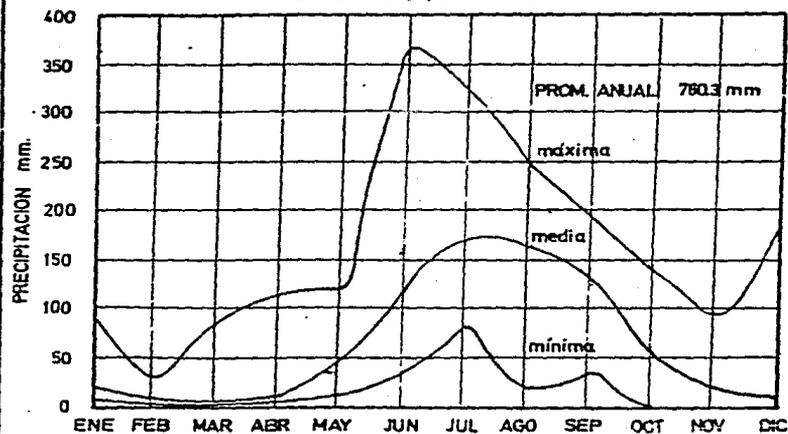


FIG 2.5 PRECIPITACION MENSUAL EN EL RIO DUERO  
(Est. Zamora, periodo 1921-1970)



## CAPITULO III

### EVALUACION DE LA CALIDAD DEL AGUA

#### 3.1 RECONOCIMIENTO DE LA ZONA.

El estudio de la calidad del agua de una corriente comprende el reconocimiento físico de la zona para determinar las características hidráulicas y físicas que presenta la corriente en estudio, la localización de todas las fuentes de contaminación que descargan en ella, mediciones de campo, toma de muestras de agua y análisis de laboratorio, las cuales se evalúan tomando en consideración los usos a que se destinan las aguas de dicha corriente.

Para el reconocimiento de esta zona se realizó un recorrido de campo donde se localizó los puntos de acceso y las estaciones hidrométricas existentes, así como las actividades correlacionadas con el recurso hidráulico.

El río Duero nace en los manantiales de Carapan. Corre en dirección este-oeste por aproximadamente 10 Kms. con una pendiente del 1.5%. pasando por los pueblos de Tacuaro, Huancito, Santo Tomás y Acahuen, recibiendo al final de este tramo las aguas del arroyo Ojo de Agua que contiene las aguas residuales de Chilchota. En este punto cambia a una dirección noroeste y en el tramo siguiente de 10 Kms. recibe por su margen izquierda al río Pejo o Santuario, el cual transporta las aguas residuales de Tangancuaro.

En el Km. 21.7 recibe un importante afluente derecho llamado río Tlazazalca, el cual cuenta con una estación hidrométrica denominada Urepetiro, la cual mide los desfuegos y derrames de la presa Urepetiro que tiene una capacidad total de 12.8 millones

de m<sup>3</sup>. Inmediatamente aguas abajo de la confluencia Tlazazalca se tiene una entrada importante por la margen izquierda, constituida por los desagües del lago de Camécuaro.

Doscientos metros aguas abajo de la confluencia del Camécuaro está la presa de derivación Platanal de donde parten los canales: Platanal a la planta hidroeléctrica y Santiaguillo para riego de cultivos. La planta hidroeléctrica utiliza en época de estiaje prácticamente todo el volumen del río Duero, genera energía eléctrica aprovechando una caída de 101 m. y regresa el agua al río Duero. La descarga de la planta se efectúa en el kilómetro 29 aproximadamente, un poco antes de una represa con vertedor de cimacio de donde parten los canales Chaparaco y Tamándaro. En el Km. 32 aproximadamente se localizan otras represas donde se inician los canales Toma de Valdés y el Tajo.

En el Km. 37.0 el río Duero recibe al que es su último afluente izquierdo de consideración llamado río Celio o Jacona.

Seiscientos metros aguas abajo se localiza la desviación de gran parte del agua por el canal Nuevo Zamora o Dren "A", en un lugar conocido como los Espinos. Este Dren "A" recibe a 800 m. abajo de su origen las aguas residuales de la ciudad de Zamora. El cauce principal del río al quedar con poca agua y en un terreno de poca pendiente, conduce las aguas a baja velocidad propiciando la proliferación de lirio acuático, el cual a la altura de Ario de Rayón cubre en forma total el cauce, en una longitud de 10 Kms. aproximadamente. El río Duero se sigue utilizando como canal principal de distribución y mediante represas se derivan los canales El Guerreño, Santa Cruz, Higuierillas y La Hanchera. En total, a lo largo del río y dentro del área del Distrito de Riego No. 61 de Zamora, Michoacán, existen 16 represas que dan origen a la red de mayor distribución. En el Km. 56 aproximadamente tiene una caída para llegar al nivel en el cual escurren los drenes de retorno y 3.7 Kms. aguas abajo se le unen los

drenes "A" y Chavinda que conducen altos volúmenes de escurri -- miento, producto de varios drenes que captan a través de su recorri -- do.

En el Km. 61.3 se localizan los poblados San Simón y Estanzuela, que se encuentran divididos sólo por el río y donde se localiza la estación hidrométrica de San Simón-Estanzuela y 300 m. aguas abajo se derivan los canales El Cerro y La Guayabera. Adelante del poblado San Simón-Estanzuela se localiza una granja -- piscícola particular que aprovecha las aguas del río Duero para el cultivo de peces. Sobre la margen derecha del río cerca del poblado Ixtlán de los Hervores se identificó un área de geisers -- con cuatro pozos que producen vapor de agua.

En el Km. 75.5 a la altura de San Cristóbal, el río se represa una vez más controlando las salidas y convirtiendo al río Duero en un embalse, durante sus últimos 30 Kms. de recorrido, hasta su desembocadura en Barraje de Ibarra, donde se controla su desfogue al río Lerma.

A la altura del poblado El Capulín, el río Duero recibe en su parte embalsada las aguas freáticas excedentes de la Ciénega de Chapala, los cuales son bombeados en la Estación Ingeniero Ballesteros para conservar un nivel freático aceptable, esto se -- realiza principalmente en época de lluvias; durante el muestreo las bombas no trabajaron por estar el agua freática a su nivel. El esquema general del funcionamiento se presenta en la figura -- 3.1.

### 3.2 LOCALIZACION DE DESCARGAS.

Desafortunadamente las aguas del río Duero son utilizadas -- como factor de dilución y transporte de aguas residuales, teniendo a lo largo de su recorrido las descargas de las poblaciones de Carapan, Chilchota, Tangancicuaro, Zamora, Jacona, Arrio de Ra

yón, San Simón-Estanzuela e Ixtlán de los Hervores, que en una forma directa o indirecta inciden sobre las aguas del río sin ningún tratamiento.

En las figuras 3.2 a 3.5 se muestran las descargas de agua residual de las poblaciones de Chilchota, Tangancicuaro, Tamora y Jacona.

### 3.3. MUESTREO .

Para realizar los análisis de agua es muy importante lo referente al muestreo, ya que un punto básico es que estos sean representativos del volumen de agua del cual se obtienen. Es conveniente, por lo tanto, que la recolección de muestras se haga en la forma más cuidadosa y eficiente siguiendo las reglas y métodos establecidos. Asimismo, gran parte del éxito del estudio sobre la calidad del agua se debe tanto a la selección de los parámetros por analizar, como a la definición del sitio del cual se toman las muestras.

La selección de las estaciones de muestreo se efectuó con el siguiente criterio:

- a) En el sitio determinado como inicio del estudio para conocer las condiciones iniciales.
- b) Antes, sobre y después, de las descargas de aguas residuales.
- c) Antes, sobre y después, de los principales afluentes.
- d) A la entrada y salida de presas y embalses.
- e) Después de la descarga de la hidroeléctrica.

Los sitios se seleccionaron considerando además las facilidades de acceso, estaciones hidrométricas e infraestructura como puentes y canales. En el río Duero se establecieron 12 estaciones de muestreo; la localización, clave de la estación, nombre y

acceso, se presentan en la figura 3.6 y el cuadro 3.1.

Las doce estaciones establecidas se muestrearon conforme a tres campañas en los meses de octubre y noviembre. La primera campaña comprendió los días 18 y 19 de octubre, la segunda campaña del 1° al 3 de noviembre, y la tercera campaña del 14 al 16 de noviembre.

Durante las campañas de muestreo se determinaron en campo, los datos de análisis y aforos necesarios para el estudio. Se midió la temperatura ambiente y la del agua, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, transparencia, color, olor y materia flotante. Para los aforos se midieron las secciones transversales en los sitios de muestreo y se determinó la velocidad de escurrimiento. Los datos obtenidos en campo, se muestran en los cuadros 3.2 a 3.13

#### 3.4 ANALISIS DE LABORATORIO.

La calidad a través de los contenidos de elementos y sustancias en el agua, se pueden conocer si se llevan a cabo exámenes minuciosos que den resultados cualitativos y cuantitativos de cada uno de ellos. De aquí que la evaluación de la contaminación sólo se concibe si se especifica el uso o destino del agua y se llevan a cabo los análisis necesarios para conocer sus contenidos. Entre los diferentes análisis existentes para determinar los parámetros que definen el grado de contaminación se encuentran los físicos, químicos y biológicos.

Los análisis de laboratorio necesarios para evaluar la calidad del agua del río Duero se efectuaron en la ciudad de México, a donde se transportaron las muestras debidamente refrigeradas y preservadas.

Las mediciones en el laboratorio fueron con apego total a-

las Normas Nacionales para Análisis de Aguas y las establecidas en los Métodos Estándar para Análisis de Agua y Agua de Desecho publicados conjuntamente por los organismos AWWA, APHA y WPCP de los Estados Unidos de Norteamérica.

Los valores de los análisis efectuados a las aguas y su evaluación estadística necesaria para su posterior aplicación se muestran en los cuadros 3.2 a 3.13. Para la obtención de los promedios se desecharon, en algunos casos, aquellos valores que presentaron características muy disparadas o fuera del ámbito para el tipo de aguas bajo estudio.

### 3.5 EVALUACION.

#### 3.5.1 Causas y efectos de los contaminantes.

A fin de conocer el estado que guarda el agua respecto a su calidad, se hace uso de ciertos parámetros característicos que rigurosamente pueden llegar a ser del orden de cientos; sin embargo, no todos son necesarios para la mayoría de las investigaciones, pudiéndose disminuir a sólo decenas. El efecto e importancia de los contaminantes más significativos en los cuerpos de agua se pueden encontrar ampliamente desarrollados en diversas publicaciones, por lo que aquí sólo se describirán de una manera breve.

#### 1) Potencial de hidrógeno (pH).

Se define como el logaritmo del recíproco de la concentración de los iones hidrógeno, es el término usado universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o alcalinas de una solución. En una corriente el pH nos da idea del tipo de proceso biológico mediante el cual se efectúa la degradación de la materia orgánica, si es que esta se está realizando, pues a un pH muy desfavorable la actividad biológica podría inhi

birse, quedando así retardada la recuperación de la corriente.

El rango de valores va de cero (muy ácido) hasta 14 (muy -- alcalino) correspondiéndole el valor de 7 al punto neutro. Tanto un pH elevado como bajo puede ser perjudicial, ocasionando la muerte de los peces y la esterilidad general de la corriente, -- así como afectar a la toxicidad de otros materiales; afortunadamente, los valores extremos de pH en aguas residuales se eliminan por neutralización.

## 2) Temperatura.

El agua de las corrientes en general adquiere la temperatura del medio ambiente y su variación con respecto a este es muy poca; está sujeta al clima local, época del año y hora del día, -- también influye la profundidad a la que se tome. La variación -- de la temperatura puede indicar principio de contaminación, pudiéndose afectar las actividades biológicas, la solubilidad de -- los gases y la viscosidad del agua que influye sobre la sedimentación; tendiendo a ser mayor la temperatura del agua contaminada que la neutral.

## 3) Oxígeno disuelto (OD)

Todos los organismos dependen del oxígeno en una forma u -- otra para mantener el proceso metabólico que proporciona la energía necesaria para su crecimiento y reproducción. En los desechos líquidos, el oxígeno disuelto es el factor que determina el tipo de transformaciones biológicas que tienen lugar en su seno efectuadas por microorganismos aerobios o anaerobios, según haya presencia o ausencia de oxígeno. La concentración de oxígeno -- puede también relacionarse con la corrosividad, con la actividad fotosintética y con el grado de septicidad que se posea.

La determinación del oxígeno disuelto es una de las pruebas

que debe hacerse de inmediato por la pérdida o ganancia que hay de acuerdo con el contenido de materia orgánica, tanto productora como consumidora de oxígeno; por lo menos debe fijarse en campo y determinarlo posteriormente en el laboratorio.

#### 4) Turbiedad.

La turbiedad puede ser causada por una amplia variedad de materiales suspendidos; es de importante consideración en las aguas de abastecimiento público, ya que cualquier turbiedad en el agua para beber produce en el consumidor pocos deseos de ingerirla y utilizarla en sus alimentos. La filtración del agua se vuelve más difícil y aumenta su costo al aumentar la turbiedad.

Los sedimentos de los ríos es una de las principales causas de la turbiedad, pero las descargas de alcantarillas y algunos tipos de afluentes industriales pueden también incrementar la concentración de las partículas suspendidas. La turbiedad interfiere con la actividad fotosintética de las plantas y con la capacidad para existir de algunos organismos.

#### 5) Conductividad eléctrica (CE).

La cantidad de corriente eléctrica transmitida a través del agua mide la concentración de todos los componentes ionizados en esta, por lo tanto, relaciona la cantidad de sólidos disueltos en la misma y se utiliza como una medida de estos componentes, asimismo, es proporcional a otros parámetros como pH, turbiedad, color, etc.

#### 6) Color.

Las aguas superficiales pueden estar coloridas debido a contaminantes domésticos e industriales, así como a sustancias naturales como el humus de los bosques o la materia vegetal. Entre-

los efectos que ocasiona el color del agua está el interferir en actividades como la pezca y la natación por la aversión natural que se tiene, así como el interferir en la transmisión de la luz en el agua reduciendo por tanto la acción fotosintética.

#### 7) Sólidos.

Cuando se tienen problemas relacionados con aguas contaminadas un parámetro indispensable es el de los sólidos contenidos, - estos determinan la cantidad de materia orgánica e inorgánica, - disuelta e insoluble que se encuentra en los líquidos y que puede sedimentarse para formar depósitos putrecibles o fondos olorosos. Con frecuencia se originan bruscas reducciones del contenido de oxígeno debido a la descomposición de estos sólidos sedimentados, provocando la muerte de los peces en grandes tramos del río o dichos sólidos son levantados por la presión de los gases de descomposición hasta la superficie del agua donde aparecen como natas y espumas, a las que se agrega algo de los sólidos que arrastra el agua y producen condiciones bastante desagradables.

#### 8) Cloruros (Cl)

Los cloruros son uno de los principales iones presentes en el agua. En concentraciones arriba de 250 mg/l imprimen al agua un sabor salado, tienen un efecto altamente corrosivo en muchos usos industriales además de ser una de las sales más tóxicas --- cuando se encuentran presentes en el agua para la agricultura. - Los cloruros son sustancias inorgánicas encontradas comúnmente en la orina del hombre y de los animales; no son afectados por los procesos biológicos ni por sedimentación.

#### 9) Nutrientes (N-Org., N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>3</sub> y PO<sub>4</sub>).

El nitrógeno y el fósforo constituyen los principales nutrientes en el crecimiento de las plantas. El problema básica-

mente comprende los efectos nocivos de la hiperfertilización de los cuerpos de agua que reciben aguas residuales de origen doméstico, industrial y agrícola. Un exceso de nutrientes provoca un desequilibrio ecológico (eutricación), además desaparecen las especies de flora y fauna de mayor utilidad para el hombre. La evaluación de los nutrientes es hecha a base de nitrógeno orgánico (N-Org), nitrógeno amoniacal (N-NH<sub>3</sub>), nitrógeno de nitratos (N-NO<sub>3</sub>) y fosfatos totales (PO<sub>4</sub>).

#### 10) Grasas y Aceites (G y A).

El término aceite representa una amplia variedad de hidrocarburos de origen mineral que abarca desde la gasolina hasta combustibles y aceites lubricantes y otros de origen animal y vegetal. Las grasas y aceites causan diversos problemas en el tratamiento de aguas residuales, además imparten al agua un sabor y olor desagradables, lo mismo que a los peces; impiden la penetración de la luz en las corrientes dificultándose la autopurificación de las mismas, debido a que se inhibe la actividad fotosintética. Este tipo de contaminantes hace al agua estéticamente desagradable, ya que se extiende en la superficie de la misma.

#### 11) Dureza.

La dureza es una característica de las aguas definida principalmente por los iones de calcio y magnesio, lo que en términos generales es simplemente una medida de la habilidad del agua para disolver el jabón. Las aguas duras (más de 150 mg/l como CaCO<sub>3</sub>) son tan satisfactorias para el consumo humano como las aguas blandas (menos de 75 mg/l como CaCO<sub>3</sub>), pero debido a su acción adversa para disolver jabón, el agua para propósitos de limpieza es completamente insatisfactoria; por otra parte, la dureza también provoca problemas de incrustación en equipo que trabaja con agua a temperaturas elevadas.

## 12) Alcalinidad.

La alcalinidad en las aguas se debe principalmente a los -- hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos presentes. Aguas altamente alcalinas no son aceptables para el abastecimiento público; - lo mismo que desechos alcalinos provocan la muerte o reducción - de la vida acuática donde son vertidos. En general la alcalinidad es una medida de la cantidad de ácido o alcali presente en - el agua.

## 13) Demanda química de oxígeno (DQO).

Es un parámetro muy usado para detectar contaminación de -- origen industrial; valora todo lo que es oxidable y no solamente a la materia orgánica, de manera que siempre es mayor el valor - de la DQO con respecto a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO); además para ciertos desechos que contienen sustancias tóxicas es ta prueba es el único método para determinar la carga orgánica, - además de que permite detectar algunos compuestos biológicos --- como la celulosa que no se mide en la DBO.

## 14) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

La DBO se define como la cantidad de oxígeno requerida por las bacterias para estabilizar la materia orgánica biodegrada -- ble en condiciones aerobias. El término biodegradable puede ser interpretado como la materia orgánica que puede servir como alimento de las bacterias, obteniéndose energía de la oxidación o - estabilización de dicha materia. La DBO es el mejor criterio -- utilizado en el control de la contaminación de corrientes donde la carga orgánica debe ser restringida para mantener el nivel de oxígeno disuelto deseado en el agua.

### 15) Análisis bacteriológicos.

La calidad sanitaria del agua y su adaptabilidad a usos generales con respecto a la presencia de bacterias, se determina por los análisis bacteriológicos, los cuales sirven para determinar la existencia de microorganismos de importancia para la salud pública. La experiencia ha establecido la significancia del grupo coliforme como el principal indicador de la calidad bacteriológica del agua.

La cantidad de bacterias coliformes presentes es una medida de la concentración de desechos domésticos en el agua y por lo tanto del posible peligro, para enfermedades intestinales. Las fuentes de coliformes son los excrementos de humanos, animales, anfibios y aves. Incluido en el grupo coliforme están las bacterias patógenas correspondientes al grupo e. coli, las cuales se originan principalmente en el intestino grueso del hombre; la presencia de e. coli es por lo tanto un indicador claro de contaminación fecal.

### 16) Análisis biológicos.

Sirven para conocer la comunicad y diversidad planctónica y bentónica que determinan las condiciones de contaminación existentes y en que etapa de contaminación se encuentran los cuerpos de agua, si es de reciente contaminación o en grado avanzado.

#### 3.5.2 Diagnóstico de la calidad del agua.

Es necesario señalar que los resultados de los análisis efectuados no representan el total de la comunidad ecológica del sistema considerado ya que no se efectuó un ciclo anual, sin embargo, los datos obtenidos proporcionan un conocimiento general de las principales características físicas, químicas y biológicas de la corriente en estudio.

Con base en los valores presentados en los cuadros 3.2 al 3.13, se muestra el comportamiento que siguieron los parámetros considerados para la evaluación de la calidad del agua del río Duero.

1) Potencial de hidrógeno.

Los valores de pH encontrados durante el primer muestreo se mantuvieron entre 7.8 y 8.5, sin embargo, las diferencias se ampliaron a principios de noviembre cuando el rango fue de 5.3 a 8.6; a mediados de noviembre los valores disminuyeron y la fluctuación fue entre 5.7 y 6.5. Considerando los promedios, las cifras se mantuvieron entre 6.3 y 8.1, lo cual sugiere la asociación de este parámetro con los iones  $\text{HCO}_3^-$ .

2) Temperatura.

El rango de la temperatura fue de 17 a 22°C correspondiendo el valor mínimo a la estación D-1 y el máximo a la estación D-6; al considerar los valores promedio el comportamiento se repitió en las estaciones mencionadas. Un valor alto se presentó en la descarga de aguas residuales de la ciudad de Zamora, siendo este de 25°C. Aunque la temperatura muestra fluctuaciones, estas pueden relacionarse principalmente con la hora de muestreo, más que a influencias externas.

3) Oxígeno disuelto.

La concentración de OD se mantiene arriba de 6.0 mg/l en la parte alta desde su nacimiento hasta Zamora. En el Km. 22.0 el OD baja de 6.9 a 6.3 mg/l por la acción de las confluencias de los ríos Santuario y Tlazazalca, los cuales llevan las aguas residuales de Tangancicuaro y Gómez Farfías respectivamente. A partir de Zamora y después de la caída del agua en los Espinos hacia el dren "A", la pendiente del río es casi nula y a partir-

de que recibe las aguas residuales de Zamora la concentración de OD se abate a valores de 4.0 mg/l y menores en la estación D-10, donde alcanza su valor más bajo que es de 2.0 mg/l. Por consiguiente, el río queda dividido prácticamente en dos partes: parte alta del inicio al Km. 38.0 en donde la concentración de OD permite el desarrollo de vida acuática mayor (peces) y la parte baja en donde la concentración es menor de 4.0 mg/l, lo cual sólo permite que algunas especies resistentes puedan vivir.

#### 4) Turbiedad.

Las variaciones de la turbiedad están asociadas principalmente por los aportes de materia orgánica y los aportes de los drenes agrícolas. En general presentó valores bajos que fluctuaron de 220 a 830 mm. correspondiendo el mínimo a la estación D-11 y el máximo a la estación D-1.

#### 5) Conductividad eléctrica.

El valor menor de este parámetro fue de 139  $\mu$ hos/cm en la estación D-1 y el mayor de 222  $\mu$ hos/cm en la estación D-12. Los cambios parecen estar asociados con el aumento de los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , debido a las actividades humanas.

#### 6) Sólidos.

La concentración de sólidos durante el muestreo presenta valores alrededor de 300 mg/l como sólidos totales, lo cual indica que se conserva dentro de lo considerado para un agua natural de escurrimiento. La mayor parte de estos sólidos totales es de carácter disuelto (aproximadamente el 70%), lo cual se relaciona más con sales de calcio o magnesio que con materia orgánica.

7) Nutrientes.

Los nutrientes presentaron valores altos durante la época de muestreo. Concentraciones de 3 mg/l de fosfatos se observa especialmente en la parte baja del río y concentraciones promedio de 3 mg/l de nitrógeno orgánico total fue identificada a lo largo de todo el río. Lo anterior favorece el crecimiento de plantas acuáticas como el lirio, el cual se observa cubriendo una longitud de aproximadamente 10 Kms. en la zona aledaña de Arroyo de Rayón y en la zona embalsada a la altura de El Capulín.

8) Demanda química de oxígeno.

Los valores de la DQO varían en un rango de 7 a 13 mg/l en los primeros 40 Kms. del río y a raíz de la descarga de agua residual de Zamora más la incorporación de los drenes de retorno agrícola, se incrementa a valores entre 60 y 70 mg/l; el incremento anterior se hace visible por lo obtenido en las estaciones D-11 y D-12.

9) Demanda bioquímica de oxígeno.

La materia orgánica carbonosa, medida como  $DBO_5$ , no presenta alteraciones considerables en la primera mitad del recorrido del río. En sus inicios la concentración es sólo natural y presenta valores de 2 mg/l. En el Km. 20.7 descarga el arroyo el Pejo o Santuario, que conduce las aguas residuales de Tangancícuaro, lo cual ocasiona un primer incremento a valores de 6.6 mg/l en promedio. Al desviarse hacia la planta hidroeléctrica El Platanal, el agua obtiene un incremento en la autopurificación por la mayor aereación recibida en las turbinas; además, al represar el agua antes de enviarse a las turbinas, parte de la materia orgánica se sedimenta por lo que su valor en la estación El Platanal (D-5) es de 4.5 mg/l como  $DBO_5$ . El valor se mantiene hasta Zamora, en donde recibe el mayor volumen de aguas residua-

les de todo el recorrido, aumentando su concentración a un promedio de 27 mg/l. A partir de Zamora y por las condiciones topográficas planas, el río recibe una menor reareación por lo que la concentración se mantiene alrededor de 20 mg/l hasta San Cristóbal, en donde el río se convierte prácticamente en una laguna sin escurrimiento contínuo.

#### 10) Análisis bacteriológicos.

Los valores encontrados en los análisis bacteriológicos realizados en 5 estaciones de muestreo (D-3, D-6, D-8, D-10 y D-12), indican la presencia de materia fecal aunque en pequeñas cantidades; sin embargo, en la zona de San Simón y Dren "A", los valores se incrementan por la acción de las descargas de Zamora y los drenes de retorno que acarrearán productos de materia orgánica. Los valores obtenidos del análisis bacteriológico se presentan en el cuadro 3.14.

#### 11) Análisis biológicos.

Para la evaluación biológica se consideró la comunidad plactónica que comprendió fito y zoopláncton mediante análisis cualitativo y cuantitativo, así como la identificación y cuantificación del bentos.

##### a) Pláncton.

La densidad de fitopláncton estuvo comprendida entre 2,078 y 332,222 org/m<sup>3</sup>, en promedio se obtuvo 83,123 org/m<sup>3</sup>; el grupo dominante en todos los muestreos fue el de las diatomeas, con registros de dominancia del 83%, siguiéndole en importancia las clorofitas con valores de 0.9 al 13% y en tercer orden aparecieron las cianofitas con valores del 0.7 al 4%. En cuanto al género fitoplanctónico dominante fue Stauroneis, siguiéndole Mastogloia y Nvicula especie 1; el número de especies varió de 13 a -

27 con un promedio de 19 especies por muestreo.

En el río Duero a la altura del poblado de Etucuaró presenta una baja densidad fitoplanctónica, la cual se mantiene hasta la estación D-3 a pesar de que los aportes del río Tlazazalca po seen una alta concentración de algas; aguas abajo el río presenta un aumento, más adelante vuelve a presentarse una baja a pesar de los aportes de nutrientes de fósforo y nitrógeno, los cu les pudieron alcanzar niveles limitantes para el crecimiento de la población o a la presencia de sustancias tóxicas originadas por los plaguicidas empleados en las zonas agrícolas adyacentes.

En relación al zooplancton, la densidad fue de cero a 24,080 org/m<sup>3</sup> con un promedio de 5,043 org/m<sup>3</sup>; los grupos más constantes fueron los rotíferos con dominancia del 0.5 al 100% y los ci liados peritrichos con valores del 32 al 95%, otros grupos que también fueron dominantes son los copepodos y los rizopodos. El número de especies varió de cero a ocho con un promedio de tres especies. De los grupos mencionados los géneros que los representaron como dominantes fueron el ciliado *Epistylis plicatilis* y el rotífero *Brachionus* con dos especies *B. calcyflorus* y *B. plicatilis*.

En la estación D-1 no se encontró zoopláncton en los tres muestreos considerados, lo que refleja un efecto negativo de la calidad del agua sobre estos organismos, sin embargo, hacen falta estudios más amplios que pudieran aclarar este hecho; río aba jo se nota un aumento de zoopláncton, alcanzando el máximo valor en la estación D-11 después de los aportes de desechos orgánicos; parece ser que en este caso los aportes no presentan características tales que pudieran afectar negativamente la población zooplanctónica.

Los valores de diversidad del fitopláncton variaron desde 2.84 hasta 4.0 bits/individuo, obteniéndose un promedio de 3.46

bits/individuo para los tres diferentes muestreos, lo que podría interpretarse como que aunque existe una tendencia hacia la eutricación, todavía las condiciones ambientales no son muy drásticas, ya que permiten el desarrollo de diversas especies que consisten en un mismo habitat, en el cual aunque existe una predominancia de 2 ó 3 especies, estas no son tan elevadas como para ejercer una presión competitiva que desplace a otros organismos.

Para el caso del zoopláncton, los valores de diversidad fluctuaron de 0 a 2.16 con un promedio de 0.96 bits/individuo. En ciertas zonas del río se observa un aumento en la diversidad zooplanctónica, favorecida posiblemente por abundantes fuentes de alimento representadas por el ascenso del fitopláncton.

Los valores obtenidos del análisis biológico para la comunidad planctónica en las estaciones de muestreo D-1, D-2, D-3, D-6, D-11 y D-12, se presentan en los cuadros 3.15 al 3.20.

#### b) Bentos.

Para la evaluación de esta comunidad se seleccionaron 3 estaciones. En cada una de ellas se tomó una muestra del sustrato de aproximadamente 5 Kg. con ayuda de una pala que cubría una área aproximada de  $0.9 \text{ m}^2$  y se vació a bolsas de polietileno. Posteriormente en el laboratorio, las muestras se pesaron y se tamizaron; cada tamiz se revisó y se separaron los organismos con ayuda de pinceles, se pasaron a frascos de vidrio y cajas de petri; el análisis se efectuó con un microscopio estereoscópico y la densidad se expresó como número de organismos por metro cuadrado.

De las tres estaciones muestreadas, sólo en dos se obtuvieron resultados; en la estación D-6 la densidad fue muy baja, en la estación D-11 la densidad fue alta, con  $2,622 \text{ org/m}^2$ , el

90% de los cuales pertenecieron al grupo de los oligoquetos con el género Tubifex. Los valores obtenidos para la comunidad bentónica se presentan en el cuadro 3.21.

### 3.5.3 Índice de calidad.

El problema más significativo para la creación de índices de calidad del agua es debido a que los usos del agua son múltiples y la calidad demandada para cada propósito varía considerablemente. Todas estas variaciones fueron consideradas para la determinación de los índices de calidad, cuyo método de cálculo fue desarrollado por S.H. Dinius y modificado por la Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica de la SARH.

El objetivo del índice de calidad es proporcionar un medio para agrupar los resultados de los análisis del agua en un porcentaje que represente su contaminación. Para demostrar la necesidad de esta conversión considérese la dureza expresada en mg/l de  $\text{CaCO}_3$ ; el agua puede contener de 0 a más de 1,000 mg/l, sin embargo, poca gente entiende el significado de este resultado, por lo tanto si los resultados de los parámetros son transformados al porcentaje de contaminación, el agua no está evaluada únicamente en términos más significativos y fáciles de entender por la mayoría de la gente, sino que también están en tal forma que se pueden interrelacionar algebraicamente todos los parámetros.

El índice de calidad varía de 0 a 100, el valor nulo corresponde al peor caso y el máximo a la calificación óptima. La ecuación que proporciona el índice de calidad es:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

donde:

I = índice de calidad general.

$I_i$  = índice de calidad del parámetro  $i$   
 $W_i$  = valor de importancia relativa del parámetro  $i$   
 $n$  = número de parámetros.

Debido a que ciertos parámetros son más representativos de la calidad del agua que otros, estos son pesados de acuerdo a su importancia. En el cuadro 3.22 se muestran los valores de la importancia relativa para los 18 parámetros que se proponen como básicos en el estudio de la calidad del agua.

Las ecuaciones definidas para el índice de calidad individual de cada uno de los 18 parámetros seleccionados para conformar el índice de calidad general, son las siguientes:

1) pH

$$I_{pH} = 10^{0.2335pH + 0.440} \quad \text{Si el pH es menor -- que 6.7}$$

$$I_{pH} = 100 \quad \text{Si el pH está entre 6.7 y 7.3}$$

$$I_{pH} = 10^{4.22 - 0.293pH} \quad \text{Si el pH es mayor -- que 7.3}$$

2) Color

$$I_c = 123(C)^{-0.295} \quad \text{(C) en unidades de - color escala de platino-cobalto.}$$

3) Turbiedad

$$I_t = 108(t)^{-0.178} \quad \text{(t) en UTJ}$$

4) Grasas y aceites

$$I_{GyA} = 87.25(GyA)^{-0.298} \quad \text{(GyA) en mg/l}$$

- 5) Sólidos suspendidos  

$$I_{ss} = 266.5(ss)^{-0.37} \quad (ss) \text{ en mg/l}$$
- 6) Sólidos disueltos  

$$I_{sd} = 109.1 - 0.0175(sd) \quad (sd) \text{ en mg/l}$$
- 7) Conductividad eléctrica  

$$I_{CE} = 540(CE)^{-0.379} \quad (CE) \text{ en } \mu\text{mhos/cm}$$
- 8) Alcalinidad  

$$I_a = 105(a)^{-0.186} \quad (a) \text{ en mg/l como } \text{CaCO}_3$$
- 9) Dureza total  

$$I_D = 10^{1.974 - 0.00174(D)} \quad (D) \text{ en mg/l como } \text{CaCO}_3$$
- 10) N de nitritos  

$$I_{NO_3} = 162.2(NO_3)^{-0.343} \quad (NO_3) \text{ en mg/l}$$
- 11) N amoniacal  

$$I_{NH_3} = 45.8(NH_3)^{-0.343} \quad (NH_3) \text{ en mg/l}$$
- 12) Fosfatos totales  

$$I_{PO_4} = 34.215(PO_4)^{-0.46} \quad (PO_4) \text{ en mg/l}$$
- 13) Cloruros  

$$I_{Cl} = 121(Cl)^{-0.223} \quad (Cl) \text{ en mg/l}$$
- 14) Oxígeno disuelto  

$$I_{OD} = \frac{(OD)}{OD_{sat}} \cdot 100 \quad (OD) \text{ en mg/l a } T^\circ \text{ de campo. } OD_{sat} \text{ en mg/l a la misma } T^\circ \text{ de campo}$$

15) Demanda bioquímica de oxígeno

$$I_{DBO} = 120(DBO)^{-0.0673} \quad (DBO) \text{ en mg/l}$$

16) Coliformes totales

$$I_{CT} = 97.5(CT)^{-0.27} \quad (CT) \text{ en NMP coli/ml}$$

17) Coliformes fecales

$$I_{Ec} = 97.5[S(Ec)]^{-0.27} \quad (Ec) = \text{Escherichia coli/ml}$$

18) Detergentes

$$I_{SAAM} = 100 - 16.678(SAAM) + 0.1587(SAAM)^2 \\ (SAAM) \text{ en mg/l.}$$

En función del índice de calidad obtenido y utilizando una escala de calificación general se obtiene el nivel de la contaminación sobre cada uno de los usos del agua. En el cuadro 3.23 se muestra la calificación general según el índice de calidad y el uso del agua. En el cuadro 3.24 se muestra el índice de calidad obtenido en cada una de las estaciones de muestreo del río Duero. De donde se observa que en el tramo comprendido desde su nacimiento hasta antes de la confluencia de los ríos Santuario y Tlazazalca, las aguas del río Duero poseen un índice de calidad mayor a 90 - por lo que no requieren de una purificación para el abastecimiento público, la industria y la agricultura, además es aceptable para la recreación, la pesca y la vida acuática. A partir de -- que recibe las primeras descargas, el índice de calidad disminuye a 82 por lo que es necesario darle una ligera purificación para poder ser utilizada en el abastecimiento público y en algunos procesos industriales. A raíz de la descarga de agua residual de Zamora, más la incorporación de los drenes de retorno agrícola, el índice de calidad disminuye a 61 por lo que la necesidad de darle un tratamiento, es mayor, además de no ser recomendable para la recreación, y de verse afectadas algunas especies de peces.

### 3.5.4 Relación de absorción de sodio.

El mayor uso que reciben las aguas del río Duero es en el riego de cultivos. Un límite para el uso del agua en riego, aun que independientemente de su grado de contaminación pero relacionado con ella, es la relación de absorción de sodio (RAS), el cual está relacionado con el porcentaje de sodio intercambiable del suelo que está en equilibrio con el agua de riego, ya que cuando las aguas de riego contienen cantidades considerables de sodio en solución, este se acumula paulatinamente en el suelo y al alcanzar ciertas concentraciones elevadas en relación con los cationes disueltos ocasiona un desequilibrio eléctrico de la miscela coloidal por lo cual el suelo se deflocula y pierde su estructura; debido a esto, la permeabilidad del suelo al aire y al agua disminuye y se favorece la formación de costras lo cual impide el desarrollo normal de los cultivos.

La expresión para calcular el RAS es la siguiente:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{[\frac{1}{2}(\text{Ca}+\text{Mg})]^{1/2}}$$

en donde Na, Ca, y Mg, son las concentraciones de los iones sodio, calcio y magnesio respectivamente en miliequivalentes por litro de agua.

En la figura 3.7 se muestra un diagrama muy usado en problemas de riego para clasificar las aguas respecto al contenido de sodio y conductividad eléctrica. Los índices para riego obtenidos para las diferentes estaciones se presentan en el cuadro 3.25. De donde se observa que se clasifica como  $C_1S_1$ , lo cual significa que es de buena calidad y puede usarse para la mayoría de los cultivos.

### 3.6 BALANCE HIDRAULICO

La hidrología de la cuenca del río Duero tiene vital importancia en la calidad del agua ya que se refleja en los volúmenes de escurrimiento y por consiguiente en el factor de dilución y autopurificación de los contaminantes.

Por lo anterior, es necesario realizar los balances hidráulicos de afluencia-extracción tanto para la época de muestreo como para la de estiaje, en la cual se presentan las condiciones críticas de calidad ya que el volumen de escurrimiento es mínimo.

Los valores hidrométricos que sirvieron de base para las evaluaciones del río, son los aforos practicados durante los años anteriores al estudio en las estaciones hidrométricas del río Duero, así como los realizados durante el muestreo. Para la época de estiaje se determinó el promedio de los siete días consecutivos más secos en un período de 20 años de registro.

En el cuadro 3.26 se presenta el resumen hidráulico de las aportaciones y extracciones tanto para la época de muestreo como para la de estiaje.

El esquema base para la distribución hidráulica de donde se obtuvieron los balances hidráulicos se muestra en la figura 3.8.

CUADRO 3.1

## ESTACIONES DE MUESTREO DEL RIO DUERO

| CLAVE ESTACION | NOMBRE DE LA ESTACION | LOCALIZACION Y ACCESO  |
|----------------|-----------------------|--|
| DUE 1          | Puente Etucuario      | Carretera Carapan-Zamora, desviación a la derecha como a ocho kilómetros de Carapan, hacia la población de Etucuario.  |
| DUE 2          | Puente Gómez Farías   | Carretera Zamora-Carapan, tomar desviación a la izquierda casi enfrente de Camécuaro y antes del puente de aforo "Las Adjuntas", como a cuatro kilómetros y antes de Gómez Farías.                                       |
| DUE 3          | Puente Las Adjuntas   | Carretera Zamora-Carapan, aproximadamente a 12 kilómetros se cruza el río Duero, después de la desviación a Gómez Farías y antes de Camécuaro.   |
| DUE 4          | Lago Camécuaro        | Carretera Zamora-Carapan hasta el puente Las Adjuntas, bajar al río por atrás de la caseta del aforador y estación climatológica. La descarga del lago llega al Duero por la margen izquierda.                           |
| DUE 5          | Puente El Platanal    | Carretera Zamora-Carapan como a seis kilómetros de Zamora tomar desviación derecha a El Platanal. Al encontrar el río continuar por la brecha lateral al río Duero hasta la presa de derivación con vertedor de cimacio. |
| DUE 6          | Puente Zamora Jacona  | Carretera Zamora-Jacona como a dos kilómetros de Zamora se encuentra el puente sobre el río Duero.   |

Continúa cuadro 3.1

| CLAVE ESTACION | NOMBRE DE LA ESTACION                | LOCALIZACION Y ACCESO   |
|----------------|--------------------------------------|---|
| DUE 7          | Puente Jacona                        | Carretera Zamora-Jacona, al entrar a Jacona se tiene el puente sobre el río Celio.  |
| DUE 8          | Descarga aguas residuales de Zamora. | Carretera Zamora-Jacona, tomar desviación -- hacia la derecha en el semáforo después del Supermercado, tomar brecha hacia Los Espinos y localizar descarga aguas residuales al -- Dren "A".   |
| DUE 9          | Dren Chavinda.                       | Carretera Zamora-Briseñas hasta desviación - al poblado de Estanzuela, cruzar el puente y continuar aguas arriba por la margen izquier da del río hasta el rancho Colongo; ahí se - localizan las confluencias del dren Chavinda y dren "A" con el río Duero. |
| DUE 10         | Dren "A"                             | Llegar a Colongo como se indica en Due 9 y - muestrear el dren "A" que confluye por la de recha al río Duero.   |
| DUE 11         | Puente Estanzuela                    | Carretera Zamora-Briseñas hasta la desvia -- ción izquierda a Estanzuela; puente cercano a estación hidrométrica.   |
| DUE 12         | Puente Ingenieros                    | Carretera Zamora-Briseñas, pasar Ixtlán de - los Herbores y en la desviación a Camacuato se encuentra el puente Ingenieros, un poco - antes de la estación de bombeo San Cristóbal.   |

CUADRO 3.2

ESTACION DE MUESTREO DUE 1 PUENTE ETUCUARO  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO             | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                              |                  | PROMEDIO |
|-----------------------|------------------------|--------------------|------------------------------|------------------|----------|
|                       |                        | 18 Oct.<br>10:00   | 1 <sup>o</sup> Nov.<br>10:00 | 15 Nov.<br>10:30 |          |
| Temperatura ambiente. | °C                     | 20                 | 21                           | 19.5             | 20       |
| Temperatura del agua  | °C                     | 17                 | 20                           | 15               | 17.3     |
| pH                    |                        | 8.3                | 6.0                          | 5.8              | 6.7      |
| OD                    | mg/l                   | 6.0                | 7.8                          | 7.0              | 6.9      |
| DBO5                  | mg/l                   | 2                  | 2                            | 2                | 2        |
| DQO                   | mg/l                   | 6                  | 7                            | 8                | 7        |
| PO <sub>4</sub>       | mg/l                   | 0.025              | 0.008                        | 0.050            | 0.027    |
| NTK <sup>4</sup>      | mg/l                   | 2                  | 3                            | 3                | 3        |
| Cl                    | mg/l                   | 6                  | 8                            | 8                | 8        |
| ST                    | mg/l                   | 388                | 324                          | 258              | 324      |
| SST                   | mg/l                   | 9                  | 21                           | 8                | 21       |
| SDT                   | mg/l                   | 379                | 203                          | 250              | 303      |
| DT                    | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 68                 | 64                           | 64               | 65       |
| DCa                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 28                 | 32                           | 32               | 32       |
| DMg                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 40                 | 32                           | 32               | 32       |
| Ca                    | mg/l                   | 11                 | 13                           | 13               | 13       |
| Mg                    | mg/l                   | 10                 | 8                            | 18               | 12       |
| Na                    | mg/l                   | 12                 | 14                           | 14               | 14       |
| AT                    | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 82                 | 80                           | 80               | 81       |
| SO <sub>4</sub>       | mg/l                   | 3                  | 3                            | 3                | 3        |
| CE <sup>4</sup>       | µmhos/cm               | 136                | 144                          | 136              | 139      |
| Turbiedad             | cm.                    | 0.95               | 0.80                         | 0.75             | 0.83     |
| Color                 |                        | café obsc.         | verde                        | claro            |          |
| Olor                  |                        | no                 | no                           | no               |          |
| Materia flotante      |                        | si                 | no                           | no               |          |

CUADRO 3.3

ESTACION DE MUESTREO DUE 2 PUENTE GOMEZ FARIAS  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO             | UNIDAD   | FECHAS DE MUESTREO |                |                  | PROMEDIO |
|-----------------------|----------|--------------------|----------------|------------------|----------|
|                       |          | 18 Oct.<br>13:45   | 2 Nov.<br>9:30 | 15 Nov.<br>11:45 |          |
| Temperatura ambiente. | °C       | 20                 | 20             | 25               | 22       |
| Temperatura del agua  | °C       | 19                 | 19             | 19               | 19       |
| pH                    |          | 8.0                | 7.6            | 5.7              | 6.6      |
| OD                    | mg/l     | 4.6                | 5.8            | 6.0              | 5.9      |
| DBO <sub>5</sub>      | mg/l     | 16                 | 10             | 13               | 13       |
| DQO                   | mg/l     | 22                 | 16             | 18               | 18       |
| PO <sub>4</sub>       | mg/l     | 0.20               | 0.23           | 0.21             | 0.21     |
| CE                    | µmhos/cm | 146                | 161            | 161              | 161      |
| Turbiedad             | cm       | 0.35               | 0.45           | 0.45             | 0.45     |
| Color                 |          | café obsc.         | verde          | gris claro       |          |
| Olor                  |          | no                 | no             | no               |          |
| Materia flotante      |          | si                 | no             | no               |          |

CUADRO 3.4

ESTACION DE MUESTREO DUE 3 "LAS ADJUNTAS"  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 18 Oct.<br>12:00   | 2 Nov.<br>10:30 | 15 Nov.<br>12:45 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 23                 | 23              | 23               | 23       |
| Temperatura del agua | °C                     | 20                 | 19              | 16.5             | 17.8     |
| pH                   |                        | 8.2                | 7.7             | 5.7              | 6.7      |
| OD                   | mg/l                   | 6.1                | 6.8             | 6.6              | 6.5      |
| DBO5                 | mg/l                   | 6                  | 7.8             | 6                | 6.6      |
| DQO                  | mg/l                   | 8                  | 16              | 14               | 13       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 0.30               | 0.48            | 0.37             | 0.38     |
| NTK                  | mg/l                   | 4                  | 6               | 5                | 5        |
| Cl                   | mg/l                   | 4                  | 8               | 8                | 8        |
| ST                   | mg/l                   | 246                | 304             | 220              | 256      |
| SST                  | mg/l                   | 46                 | 106             | 100              | 100      |
| SDT                  | mg/l                   | 200                | 198             | 120              | 156      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 72                 | 70              | 72               | 72       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 28                 | 40              | 40               | 40       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 44                 | 30              | 32               | 36       |
| Ca                   | mg/l                   | 11                 | 16              | 16               | 16       |
| Mg                   | mg/l                   | 11                 | 7               | 8                | 9        |
| Na                   | mg/l                   | 11                 | 13              | 10               | 11       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 86                 | 82              | 80               | 82       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 4                  | 5               | 3                | 4        |
| CE                   | µhos/cm                | 140                | 146             | 141              | 143      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.60               | 0.35            | 0.30             | 0.32     |
| Color                |                        | café obsc.         | café            | gris claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              |                  |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no              |                  |          |

CUADRO 3-5

ESTACION DE MUESTREO DUF 4 LAGO CAMECUARO  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO             | UNIDAD   | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|-----------------------|----------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                       |          | 18 Oct.<br>12:30   | 2 Nov.<br>11:00 | 15 Nov.<br>13:00 |          |
| Temperatura ambiente. | °C       | 23                 | 23              | 23               | 23       |
| Temperatura del agua  | °C       | 20                 | 19              | 20               | 20       |
| pH                    |          | 8.5                | 7.9             | 6.6              | 7.7      |
| OD                    | mg/l     | 6.0                | 5.8             | 7.0              | 6.3      |
| DBO <sub>5</sub>      | mg/l     | 2                  | 2               | 2                | 2        |
| DQO                   | mg/l     | 10                 | 12              | 8                | 10       |
| PO <sub>4</sub>       | mg/l     | 0.11               | 0.08            | 0.08             | 0.09     |
| CE                    | µmhos/cm | 158                | 161             | 161              | 160      |
| Turbiedad             | cm       | 0.35               | 0.35            | 0.35             | 0.35     |
| Color                 |          | claro              | verde           | transp.          |          |
| Olor                  |          | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante      |          | no                 | no              | no               |          |

CUADRO 3.6

ESTACION DE MUESTREO DUE 5 PUENTE EL PLATANAL  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 18 Oct.<br>14:40   | 2 Nov.<br>11:30 | 15 Nov.<br>14:00 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 26                 | 27.5            | 26               | 26.5     |
| Temperatura del agua | °C                     | 20                 | 20.5            | 18.5             | 20       |
| pH                   |                        | 8.0                | 7.9             | 5.9              | 7.3      |
| OD                   | mg/l                   | 6.0                | 5.8             | 6.2              | 6.0      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 3                  | 4.5             | 6                | 4.5      |
| DQO                  | mg/l                   | 10                 | 13              | 16               | 13       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 0.30               | 0.13            | 0.71             | 0.38     |
| NTK                  | mg/l                   | 5                  | 6               | 6                | 6        |
| Cl                   | mg/l                   | 8                  | 8               | 8                | 8        |
| ST                   | mg/l                   | 446                | 268             | 276              | 330      |
| SST                  | mg/l                   | 56                 | 52              | 96               | 68       |
| SDT                  | mg/l                   | 390                | 216             | 180              | 262      |
| DT                   | mg/l                   | 68                 | 68              | 80               | 68       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 32                 | 40              | 40               | 40       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 36                 | 28              | 16               | 23       |
| Ca                   | mg/l                   | 13                 | 16              | 16               | 15       |
| Mg                   | mg/l                   | 9                  | 7               | 10               | 9        |
| Na                   | mg/l                   | 15                 | 12              | 9                | 12       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 86                 | 80              | 84               | 84       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 3                  | 3               | 3                | 3        |
| CE                   | µmhos/cm               | 144                | 141             | 147              | 144      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.40               | 0.30            | 0.40             | 0.37     |
| Color                |                        | café obsc.         | café            | café cluro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no              | no               |          |

CUADRO 3.7

ESTACION DE MUESTREO DUE 6 PUENTE ZAMORA-JACONA  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 18 Oct.<br>15:40   | 2 Nov.<br>13:00 | 15 Nov.<br>15:00 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 27                 | 27              | 27               | 27       |
| Temperatura del agua | °C                     | 21                 | 22              | 19               | 21       |
| pH                   |                        | 7.8                | 8.4             | 6.5              | 7.6      |
| OD                   | mg/l                   | 6.6                | 6.0             | 7.4              | 6.7      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 5                  | 6               | 5                | 5.3      |
| DQO                  | mg/l                   | 8                  | 16              | 14               | 13       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 0.20               | 0.60            | 0.60             | 0.46     |
| NTK                  | mg/l                   | 5                  | 2               | 3                | 3        |
| Cl                   | mg/l                   | 8                  | 8               | 4                | 8        |
| ST                   | mg/l                   | 268                | 212             | 252              | 244      |
| SST                  | mg/l                   | 54                 | 48              | 45               | 50       |
| SDT                  | mg/l                   | 214                | 164             | 207              | 194      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 72                 | 70              | 68               | 70       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 42                 | 42              | 44               | 42       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 30                 | 28              | 24               | 28       |
| Ca                   | mg/l                   | 17                 | 17              | 18               | 17       |
| Mg                   | mg/l                   | 7                  | 7               | 6                | 7        |
| Na                   | mg/l                   | 14                 | 15              | 12               | 14       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 86                 | 84              | 72               | 80       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 4                  | 7               | 15               | 8        |
| CE                   | µmhos/cm               | 155                | 157             | 156              | 156      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.30               | 0.50            | 0.30             | 0.37     |
| Color                |                        | café obsc.         | café            | café claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no              | no               |          |

CUADRO 3.8

ESTACION DE MUESTREO DUE 7 PUENTE JACONA  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 18 Oct.<br>16:10   | 2 Nov.<br>13:50 | 15 Nov.<br>15:30 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 27                 | 27              | 27               | 27       |
| Temperatura del agua | °C                     | 22                 | 33              | 21               | 21.5     |
| pH                   |                        | 8.5                | 8.6             | 6.4              | 7.8      |
| OD                   | mg/l                   | 6.6                | 6.6             | 6.2              | 6.6      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 3                  | 4               | 4                | 4        |
| DQO                  | mg/l                   | 10                 | 14              | 12               | 12       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 0.30               | 0.41            | 0.50             | 0.40     |
| NTK                  | mg/l                   | 2                  | 3               | 4                | 3        |
| Cl                   | mg/l                   | 8                  | 8               | 8                | 8        |
| ST                   | mg/l                   | 318                | 212             | 312              | 280      |
| SST                  | mg/l                   | 54                 | 66              | 58               | 60       |
| SDT                  | mg/l                   | 264                | 146             | 254              | 220      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 64                 | 64              | 64               | 64       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 40                 | 32              | 48               | 40       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 24                 | 32              | 16               | 24       |
| Ca                   | mg/l                   | 16                 | 13              | 19               | 16       |
| Mg                   | mg/l                   | 6                  | 8               | 4                | 6        |
| Na                   | mg/l                   | 17                 | 13              | 14               | 14       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 86                 | 76              | 80               | 80       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 4                  | 7               | 4                | 5        |
| CE                   | µmhos/cm               | 148                | 158             | 147              | 151      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.30               | 0.30            | 0.25             | 0.28     |
| Color                |                        | café obsc.         | café            | café claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante.    |                        | no                 | si              | no               |          |

CUADRO 3.9

ESTACION DE MUESTREO DUE 8 DESCARGA a.r. ZAMORA  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD   | FECHAS DE MUESTREO |                 |                 | PROMEDIO |
|----------------------|----------|--------------------|-----------------|-----------------|----------|
|                      |          | 18 Oct.<br>17:20   | 2 Nov.<br>14:20 | 15 Nov.<br>8:00 |          |
| Temperatura ambiente | °C       | 27                 | 27              | 27              | 27       |
| Temperatura del agua | °C       | 25                 | 25              | 25              | 25       |
| pH                   |          | 7.5                | 7.5             | 7.5             | 7.5      |
| OD                   | mg/l     | 0.0                | 0.4             | 0.3             | 0.0      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l     | 200                | 200             | 200             | 200      |
| CE                   | µmhos/cm | 583                | 489             | 536             | 536      |
| Turbiedad            | cm       | 0.80               | 0.80            | 0.80            | 0.80     |
| Color                |          | negro obsc.        | negro           | negro obsc.     |          |
| Olor                 |          | si                 | si              | si              |          |
| Materia flotante     |          | si                 | si              | si              |          |

CUADRO 3.10

ESTACION DE MUESTREO DUE 9 DREN CHAVINDA  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                 | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------|
|                      |                        | 18 Oct.<br>18:15   | 2 Nov.<br>16:00 | 15 Nov.<br>9:30 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 25                 | 28              | 23              | 26       |
| Temperatura del agua | °C                     | 18                 | 23              | 14              | 18.3     |
| pH                   |                        | 6.9                | 8.4             | 5.7             | 7.0      |
| OD                   | mg/l                   | 6.2                | 6.2             | 6.2             | 6.2      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 12                 | 16              | 8               | 12       |
| DQO                  | mg/l                   | 28                 | 28              | 28              | 28       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 0.24               | 0.21            | 0.30            | 0.25     |
| NTK                  | mg/l                   | 3                  | 3               | 3               | 3        |
| Cl                   | mg/l                   | 10                 | 12              | 8               | 10       |
| ST                   | mg/l                   | 316                | 336             | 296             | 316      |
| SST                  | mg/l                   | 86                 | 100             | 72              | 86       |
| SDT                  | mg/l                   | 230                | 236             | 224             | 230      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 90                 | 96              | 84              | 90       |
| Dca                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 54                 | 48              | 60              | 54       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 36                 | 48              | 24              | 36       |
| Ca                   | mg/l                   | 20                 | 19              | 24              | 21       |
| Mg                   | mg/l                   | 9                  | 12              | 6               | 9        |
| Na                   | mg/l                   | 15                 | 21              | 9               | 15       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 94                 | 108             | 80              | 94       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 12                 | 15              | 12              | 13       |
| CE                   | µnhos/cm               | 201                | 217             | 188             | 202      |
| Turbiedad            |                        | 0.14               | 0.15            | 0.15            | 0.15     |
| Color                |                        | café               | café            | café obsc.      |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no              |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no              | no              |          |

CUADRO 3.11

ESTACION DE MUESTREO DUE 10 DREN "A"  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 19 Oct.<br>14:00   | 2 Nov.<br>18:00 | 15 Nov.<br>10:30 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 24                 | 25              | 23               | 24       |
| Temperatura del agua | °C                     | 19                 | 22              | 17               | 19       |
| pH                   |                        | 7.0                | 7.8             | 5.8              | 6.8      |
| OD                   | mg/l                   | 2.4                | 1.6             | 2.0              | 2.0      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 27                 | 27              | 24               | 26       |
| DQO                  | mg/l                   | 43                 | 42              | 44               | 43       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 1.20               | 1.43            | 1.0              | 1.21     |
| NTK                  | mg/l                   | 5                  | 6               | 4                | 5        |
| Cl                   | mg/l                   | 12                 | 12              | 12               | 12       |
| ST                   | mg/l                   | 280                | 270             | 284              | 278      |
| SST                  | mg/l                   | 78                 | 74              | 82               | 78       |
| SDT                  | mg/l                   | 202                | 196             | 202              | 200      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 94                 | 92              | 96               | 94       |
| Dca                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 52                 | 52              | 52               | 52       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 42                 | 40              | 44               | 42       |
| Ca                   | mg/l                   | 21                 | 21              | 21               | 21       |
| Mg                   | mg/l                   | 12                 | 10              | 11               | 11       |
| Na                   | mg/l                   | 19                 | 17              | 18               | 18       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 102                | 96              | 108              | 102      |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 12                 | 15              | 9                | 12       |
| CE                   | µmhos/cm               | 221                | 218             | 224              | 221      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.24               | 0.25            | 0.20             | 0.23     |
| Color                |                        | café obsc.         | café            | café claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no              | no               |          |

09

CUADRO 3.12

ESTACION DE MUESTREO DUE 11 PUENTE ESTANZUELA  
CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                 |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|-----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 19 Oct.<br>12:00   | 2 Nov.<br>17:00 | 15 Nov.<br>16:30 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 27                 | 27              | 27               | 27       |
| Temperatura del agua | °C                     | 22                 | 21.5            | 20               | 21.2     |
| pH                   |                        | 7.8                | 7.8             | 5.7              | 7.1      |
| OD                   | mg/l                   | 3.0                | 3.0             | 3.0              | 3.0      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 20                 | 20              | 26               | 22       |
| DQO                  | mg/l                   | 66                 | 72              | 84               | 74       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 3.0                | 1.6             | 1.8              | 2.13     |
| NTK                  | mg/l                   | 2                  | 5               | 3                | 3        |
| Cl                   | mg/l                   | 12                 | 12              | 12               | 12       |
| ST                   | mg/l                   | 248                | 315             | 360              | 308      |
| SST                  | mg/l                   | 74                 | 80              | 100              | 84       |
| SDT                  | mg/l                   | 174                | 235             | 260              | 224      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 84                 | 92              | 86               | 87       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 64                 | 44              | 66               | 64       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 20                 | 20              | 20               | 20       |
| Ca                   | mg/l                   | 26                 | 18              | 26               | 23       |
| Mg                   | mg/l                   | 5                  | 12              | 5                | 7        |
| Na                   | mg/l                   | 23                 | 15              | 30               | 23       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 114                | 92              | 100              | 102      |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 7                  | 15              | 32               | 18       |
| CE                   | µmhos/cm               | 208                | 212             | 212              | 210      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.26               | 2.15            | 0.25             | 0.22     |
| Color                |                        | café               | café            | café claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no              | no               |          |
| Materia flotante     |                        | si                 | no              | no               |          |

CUADRO 3.13

ESTACION DE MUESTREO DUE 12 PUENTE INGENIEROS  
 CARACTERISTICAS DE CALIDAD

| PARAMETRO            | UNIDAD                 | FECHAS DE MUESTREO |                |                  | PROMEDIO |
|----------------------|------------------------|--------------------|----------------|------------------|----------|
|                      |                        | 19 Oct.<br>10:00   | 3 Nov.<br>9:00 | 15 Nov.<br>17:45 |          |
| Temperatura ambiente | °C                     | 26                 | 24             | 27               | 26       |
| Temperatura del agua | °C                     | 21                 | 20.5           | 20               | 20.5     |
| pH                   |                        | 7.8                | 7.3            | 5.9              | 6.3      |
| OD                   | mg/l                   | 4.6                | 5.0            | 4.8              | 4.8      |
| DBO <sub>5</sub>     | mg/l                   | 21                 | 21             | 12               | 18       |
| DQO                  | mg/l                   | 45                 | 67             | 78               | 63       |
| PO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 2.20               | 1.43           | 1.70             | 1.77     |
| NTK                  | mg/l                   | 2                  | 7              | 4                | 4        |
| Cl                   | mg/l                   | 12                 | 12             | 8                | 12       |
| ST                   | mg/l                   | 310                | 240            | 270              | 270      |
| SST                  | mg/l                   | 80                 | 48             | 72               | 72       |
| SDT                  | mg/l                   | 230                | 192            | 198              | 198      |
| DT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 84                 | 88             | 88               | 88       |
| DCa                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 44                 | 52             | 44               | 44       |
| DMg                  | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 40                 | 36             | 44               | 40       |
| Ca                   | mg/l                   | 18                 | 21             | 18               | 18       |
| Mg                   | mg/l                   | 10                 | 9              | 11               | 10       |
| Na                   | mg/l                   | 26                 | 14             | 10               | 16       |
| AT                   | mg/l CaCO <sub>3</sub> | 112                | 96             | 64               | 90       |
| SO <sub>4</sub>      | mg/l                   | 10                 | 7              | 32               | 16       |
| CE                   | µmhos/cm               | 218                | 222            | 226              | 222      |
| Turbiedad            | cm                     | 0.42               | 0.20           | 0.25             | 0.29     |
| Color                |                        | café claro         | café           | café claro       |          |
| Olor                 |                        | no                 | no             | no               |          |
| Materia flotante     |                        | no                 | no             | no               |          |

CUADRO 3.14

## CALIDAD BACTERIOLOGICA DEL AGUA DEL RIO DUERO

| ESTACION                               | COLIFORMES mg/100 ml. |           |
|--|-----------------------|-----------|
|  | TOTALES               | FECALIS   |
| Puente Zamora - Jacona                 | 180,000               | 120,000   |
| Puente Jacona                          | 215,000               | 180,000   |
| Descarga aguas residuales<br>de Zamora | 46,000                | 32,000    |
| Dren "A"                               | 4'600,000             | 3'575,000 |
| Puente Ingenieros                      | 45,000                | 28,000    |

CUADRO 3.15

ABUNDANCIA RELATIVA (%) DE GRUPOS FITOPLANCTONICOS EN EL RIO DUERO

| GRUPO TAXANOMICO | 17 - 18 OCTUBRE |       |       |       | 1 - 2 NOVIEMBRE |       |       |       |       |       | 14 - 15 NOVIEMBRE |       |     |       |       |       |
|------------------|-----------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-----|-------|-------|-------|
|                  | D1              | D6    | D11   | D12   | D1              | D2    | D3    | D6    | D11   | D12   | D1                | D2    | D3  | D6    | D11   | D12   |
| Cianophyta       | 3.28            | 1.33  | 1.80  | 4.24  |                 | 3.8   | 2.56  | 1.24  | 3.82  |       |                   | 0.70  |     |       |       | 1.46  |
| Chlorophyta      | 1.64            |       | 0.90  | 3.40  | 3.23            | 12.67 |       | 3.10  | 2.22  | 12.99 | 9.09              | 3.50  |     | 0.49  | 3.11  | 1.93  |
| Euglenophyta     |                 |       | 2.70  |       |                 |       |       | 0.62  |       |       |                   |       |     |       |       |       |
| Bacillanophyta   | 95.10           | 98.64 | 94.59 | 98.36 | 96.80           | 83.52 | 97.41 | 95.63 | 94.36 | 87.03 | 91.10             | 95.83 | 100 | 95.00 | 96.85 | 96.57 |

CUADRO 3.16

ABUNDANCIA RELATIVA (%) DE GRUPOS ZOOPLANCTONICOS EN EL RIO DUERO

| GRUPO<br>TAXONOMICO | 17 - 18 OCTUBRE |      |       |       | 1 - 2 NOVIEMBRE |       |     |       |       |       | 14 - 15 NOVIEMBRE |    |     |       |       |       |
|---------------------|-----------------|------|-------|-------|-----------------|-------|-----|-------|-------|-------|-------------------|----|-----|-------|-------|-------|
|                     | D1              | D6   | D11   | D12   | D1              | D2    | D3  | D6    | D11   | D12   | D1                | D2 | D3  | D6    | D11   | D12   |
| Ciliata             |                 |      | 58.82 |       |                 |       |     | 89.00 | 95.45 | 71.43 |                   |    |     | 71.43 | 80.00 | 31.60 |
| Rhizopoda           |                 | 25.0 | 11.76 | 54.54 |                 |       |     | 10.47 |       |       |                   |    |     |       |       | 10.53 |
| Rotifera            |                 | 25.0 | 29.41 | 27.27 |                 | 11.12 |     | 0.50  | 4.55  | 16.67 | 100               |    |     |       | 20.00 | 42.13 |
| Cludocera           |                 |      |       |       |                 | 5.56  |     | 0.50  | 4.55  |       |                   |    | 100 | 14.29 |       |       |
| Cupezopoda          |                 | 25.0 |       | 18.18 |                 | 83.34 | 100 |       |       | 11.91 |                   |    |     | 14.29 |       | 15.80 |
| Insecto             |                 | 25.0 |       |       |                 |       |     |       |       |       |                   |    |     |       |       |       |

CUADRO 3.17

RELACION DE ESPECIES FITOPLANCTONICAS DOMINANTES  
A TRAVES DE LAS DIFERENTES FECHAS DE MUESTREO

| ESTACION<br>FECHA    | D 1                  | D 2                   | D 3                 | D 6                   | D 11                 | D 12                |
|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| 17 - 19<br>OCTUBRE   | Stauroneis<br>27.87  |                       |                     | Stauroneis<br>29.46   | Stauroneis<br>35.19  | Melosira<br>21.19   |
|                      | Melosira<br>13.11    |                       |                     | Melosira<br>17.73     | Navicula 1<br>8.33   | Stauroneis<br>12.71 |
|                      | Amphipleura<br>9.84  |                       |                     | Tabellaria 2<br>12.37 |                      | Navicula 1<br>7.63  |
| 1 - 2<br>NOVIEMBRE   | Amphipleura<br>19.35 | Tabellaria<br>26.62   | Masthoglia<br>20.51 | Stauroneis<br>43.48   | Navicula 1<br>14.45  | Synedra<br>18.18    |
|                      | Stauroneis<br>16.13  | Stauroneis<br>10.14   | Opephora<br>10.26   | Tabellaria 2<br>8.07  | Masthoglia<br>12.84  | Navicula 1<br>15.28 |
|                      | Cocconeis<br>16.13   | Dratoma<br>7.60       | Navicula 1<br>12.32 | Frustulia<br>6.83     | Amphipleura<br>11.24 |                     |
| 14 - 15<br>NOVIEMBRE | Masthoglia<br>18.18  | Navicula 2<br>22.38   | Frustulia<br>20.00  | Masthoglia<br>30.53   | Synedra<br>27.42     | Masthoglia<br>17.56 |
|                      | Tabellaria<br>16.36  | Tabellaria 1<br>18.18 | Masthoglia<br>16.00 | Tabellaria<br>14.65   | Navicula 2<br>23.77  | Stauroneis<br>10.24 |
|                      | Opephora<br>16.36    | Tabellaria 2<br>13.29 |                     | Opephora<br>10.38     | Masthoglia<br>10.97  | Melosira<br>7.32    |

CUADRO 3.18

RELACION DE ESPECIES ZOOPLANCTONICAS DOMINANTES  
A TRAVES DE LAS DIFERENTES FECHAS DE MUESTREO

| ESTACION<br>FECHA    | D 1       | D 2                  | D 3            | D 6                   | D 11                             | D 12                               |
|----------------------|-----------|----------------------|----------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 17 - 18<br>OCTUBRE   |           |                      |                | Arcella<br>25.0       | Epistylis<br>58.82               | Diffflugia<br>45.45                |
|                      |           |                      |                | Asplachna<br>25.0     | Chromagaster<br>17.65            | Brichorius<br>27.27                |
|                      |           |                      |                | Nanplio<br>25.0       |                                  |                                    |
| 1 - 2<br>NOVIEMBRE   |           | Cyclops<br>77.78     | Cyclops<br>100 | Epistylis<br>41.88    | Epistylis<br>95.45               | Epistylis<br>71.43                 |
|                      |           | Chromagaster<br>5.56 |                | Zoothamnium<br>26.18  | Chromagaster<br>4.55             | Comochilus<br>4.76                 |
|                      |           | Polyphemus<br>5.56   |                |                       |                                  |                                    |
| 14 - 15<br>NOVIEMBRE | Lepadella |                      | Cypridopsis    | Epistylis             | Epistylis                        | Epistylis                          |
|                      |           |                      |                | Ceriodophnia<br>14.29 | Brachionus<br>Calcythorys<br>5.0 | Brachiorus<br>Calceyflorys<br>31.6 |
|                      |           |                      |                | Nanplio<br>14.29      | Brachionus<br>Caleyhorus<br>5.0  | Canthocumptus<br>15.8              |

CUADRO 3.19

## DENSIDAD Y ESTIMACIONES DE DIVERSIDAD DEL FITOPLANCTON

|                             | 17 - 18 OCTUBRE |         |         |       | 1 - 2 NOVIEMBRE |        |        |         |        |        |
|-----------------------------|-----------------|---------|---------|-------|-----------------|--------|--------|---------|--------|--------|
|                             | D1              | D6      | D11     | D12   | D1              | D2     | D3     | D6      | D11    | D12    |
| Densidad org/m <sup>3</sup> | 32,872          | 332,222 | 123,333 | 6,555 | 32,738          | 80,653 | 19,933 | 164,578 | 65,684 | 73,578 |
| No. de especies             | 14              | 18      | 21      | 22    | 13              | 25     | 15     | 27      | 20     | 23     |
| Diversidad H'               | 3.31            | 2.84    | 3.57    | 3.83  | 3.33            | 3.94   | 3.53   | 3.32    | 4.00   | 3.85   |
| Diversidad Máxima<br>H'máx. | 3.81            | 4.17    | 4.39    | 4.46  | 3.70            | 4.64   | 3.90   | 4.75    | 4.32   | 4.52   |
| Equidad J                   | 0.87            | 0.68    | 0.81    | 0.86  | 0.90            | 0.84   | 0.90   | 0.70    | 0.92   | 0.85   |

|                             | 14 - 15 NOVIEMBRE |         |        |         |        |        |
|-----------------------------|-------------------|---------|--------|---------|--------|--------|
|                             | D1                | D2      | D3     | D6      | D11    | D12    |
| Densidad org/m <sup>3</sup> | 2,078             | 138,844 | 23,333 | 172,900 | 24,311 | 73,666 |
| No. de especies             | 15                | 21      | 14     | 17      | 14     | 22     |
| Diversidad H'               | 3.29              | 3.28    | 3.56   | 3.28    | 3.06   | 3.37   |
| Diversidad Máxima<br>H'máx. | 3.90              | 4.39    | 3.81   | 4.09    | 3.81   | 4.46   |
| Equidad J                   | 0.84              | 0.75    | 0.93   | 0.80    | 0.80   | 0.76   |

CUADRO 3.20

## DENSIDAD Y ESTIMACIONES DE DIVERSIDAD DEL ZOOPLANCTON

|                             | 17-18 OCTUBRE |     |       |      | 1 - 2 NOVIEMBRE |      |     |       |        |        | 14 - 15 NOVIEMBRE |    |     |      |      |       |
|-----------------------------|---------------|-----|-------|------|-----------------|------|-----|-------|--------|--------|-------------------|----|-----|------|------|-------|
|                             | D1            | D6  | D11   | D12  | D1              | D2   | D3  | D6    | D11    | D12    | D1                | D2 | D3  | D6   | D11  | D12   |
| Densidad org/m <sup>3</sup> | 0             | 178 | 8,899 | 611  | 0               | 920  | 511 | 9,762 | 22,489 | 24,080 | 38                | 0  | 933 | 369  | 889  | 1,024 |
| No.de especies              | 0             | 4   | 5     | 5    | 0               | 5    | 1   | 6     | 2      | 8      | 1                 | 0  | 1   | 3    | 5    | 5     |
| Diversidad H'               |               | 2.0 | 1.73  | 1.96 |                 | 1.20 | 0   | 2.09  | 0.26   | 1.64   | 0                 |    | 0   | 1.15 | 1.14 | 2.16  |
| Diversidad Máxima<br>H'máx. |               | 2.0 | 2.32  | 2.32 |                 | 2.32 |     | 2.58  | 1.0    | 3.0    |                   |    |     | 1.58 | 2.32 | 2.32  |
| Equidad J                   |               | 1.0 | 0.74  | 0.84 |                 | 0.52 |     | 0.81  | 0.26   | 0.55   |                   |    |     | 0.73 | 0.49 | 0.93  |

CUADRO 3.21  
DENSIDAD BENTONICA DEL RIO DUERO

| Grupo Taxonómico               | D6 | D11  |
|--------------------------------|----|------|
| G. Tubifey                     | 1  | 226  |
| Fam. Lumbriculidae             |    | 2    |
| G. Helobdella                  |    | 3    |
| G. Laezipex                    |    | 4    |
| Orden Diptera (pupa)           |    | 1    |
| Total                          | 1  | 236  |
| Densidad (org/m <sup>2</sup> ) | 11 | 2622 |

CUADRO 3.22  
IMPORTANCIA RELATIVA DE LOS PARAMETROS PARA  
DEFINIR EL INDICE DE CALIDAD

| Parámetro               | Importancia relativa |
|-------------------------|----------------------|
| PH                      | 1.0                  |
| color                   | 1.0                  |
| Turbiedad               | 0.5                  |
| Gravas y aceites        | 2.0                  |
| Sólidos suspendidos     | 1.0                  |
| Sólidos disueltos       | 0.5                  |
| Conductividad eléctrica | 2.0                  |
| Alcalinidad             | 1.0                  |
| Dureza total            | 1.0                  |
| N. de nitratos          | 2.0                  |
| N. Amoniacal            | 2.0                  |
| Fosfatos totales        | 2.0                  |
| Cloruros                | 0.5                  |
| Oxígeno disuelto        | 5.0                  |
| DBO                     | 5.0                  |
| Coliformes totales      | 3.0                  |
| Coliformes fecales      | 4.0                  |
| Detergentes (SAAM)      | 3.0                  |

CUADRO 3.23  
CALIFICACION GENERAL SEGUN EL INDICE DE CALIDAD Y EL USO DEL AGUA

|     |                                |   |                                     |   |                        |                                 |             |
|-----|--------------------------------|---|-------------------------------------|---|------------------------|---------------------------------|-------------|
| 100 | no requiere purificación       | aceptable para cualquier deporte acuático | aceptable para todos los organismos | no requiere purificación                      | aceptable              | aceptable                       |             |
| 90  | ligera purificación            |   |                                     | ligera purificación para algunos procesos     |                        |                                 |             |
| 80  | mayor necesidad de tratamiento | aceptable pero no recomendable            | excepto especies muy sensibles      | sin tratamiento para industria normal         |                        |                                 |             |
| 70  |                                |   | dudoso para especies sensibles      | con tratamiento en la mayor parte de la misma |                        |                                 |             |
| 60  | dudoso                         | dudoso para contacto directo              | solo organismos muy resistentes     | uso muy restringido                           |                        |                                 | restringido |
| 50  | inaceptable                    | sin contacto con el agua                  | inaceptable                         | uso muy restringido                           |                        |                                 | inaceptable |
| 40  |                                | uso muy restringido                       |                                     | inaceptable                                   | inaceptable            | inaceptable                     |             |
| 30  | inaceptable                    | inaceptable                               | inaceptable                         | inaceptable                                   | inaceptable            | inaceptable                     |             |
| 20  |                                | inaceptable                               |                                     | inaceptable                                   | inaceptable            | inaceptable                     |             |
| 10  | Abastecimiento público         | Recreación                                | Pesca y vida y vida acuática        | Industrial y agrícola                         | Abastecimiento público | Transporte de desechos tratados |             |
| 0   |                                |   |                                     |   | navegación             |                                 |             |

CUADRO 3.24  
INDICE DE CALIDAD EN LAS ESTACIONES DEL RIO DUERO

| Parámetro           | Importancia relativa | DUE 1   |       | DUE 2   |       | DUE 3   |       | DUE 4   |       | DUE 5   |       | DUE 6   |       |
|---------------------|----------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
|                     |                      | Prom.   | I.    |
| p <sup>H</sup>      | 1.0                  | 6.7     | 100   | 6.6     | 95.74 | 6.7     | 100   | 7.7     | 92.02 | 7.3     | 100   | 7.6     | 98.45 |
| Sólidos suspendidos | 1.0                  | 2.1     | 86.39 |         |       | 100     | 48.50 |         |       | 6.8     | 55.93 | 5.0     | 62.67 |
| Sólidos disueltos   | 0.5                  | 303     | 100   |         |       | 156     | 100   |         |       | 262     | 100   | 194     | 100   |
| Conductividad eléc  | 2.0                  | 139     | 83.21 | 161     | 78.71 | 143     | 82.32 | 160     | 78.89 | 144     | 82.11 | 156     | 79.82 |
| Alcalinidad         | 1.0                  | 81      | 46.38 |         |       | 82      | 46.26 |         |       | 84      | 46.05 | 80      | 46.47 |
| Dureza total        | 1.0                  | 65      | 72.59 |         |       | 72      | 70.59 |         |       | 68      | 71.73 | 70      | 71.15 |
| Fosfatos totales    | 2.0                  | 0.027   | 100   | 0.21    | 70.14 | 0.38    | 53.40 | 0.09    | 100   | 0.38    | 53.40 | 0.46    | 48.90 |
| Cloruros            | 0.5                  | 8       | 76.10 |         |       | 8       | 76.10 |         |       | 8       | 76.10 | 8       | 76.10 |
| Oxígeno disuelto    | 5.0                  | 6.9     | 94.52 | 5.9     | 80.82 | 6.5     | 86.67 | 6.3     | 86.30 | 6.0     | 82.19 | 6.7     | 90.54 |
| DBO                 | 5.0                  | 2       | 100   | 13      | 100   | 6.6     | 100   | 2       | 100   | 5.5     | 100   | 5.3     | 100   |
| ΣWI                 | 19.0                 | 1732.43 |       | 1297.54 |       | 1558.19 |       | 1381.30 |       | 1643.73 |       | 1576.62 |       |
| I                   |                      | 91.18   |       | 86.50   |       | 82.01   |       | 92.09   |       | 81.25   |       | 82.98   |       |

72

| Parámetro           | Importancia relativa | DUE 7   |       | DUE 8  |       | DUE 9   |       | DUE 10  |       | DUE 11  |       | DUE 12  |       |
|---------------------|----------------------|---------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
|                     |                      | Prom.   | I.    | Prom.  | I.    | Prom.   | I.    | Prom.   | I.    | Prom.   | I.    | Prom.   | I.    |
| p <sup>H</sup>      | 1.0                  | 7.8     | 86.02 | 7.5    | 100   | 7.0     | 100   | 6.9     | 100   | 7.1     | 100   | 6.3     | 81.84 |
| Sólidos suspendidos | 1.0                  | 60      | 58.58 |        |       | 86      | 51.28 | 78      | 53.16 | 8.4     | 51.73 | 72      | 54.76 |
| Sólidos disueltos   | 0.5                  | 220     | 100   |        |       | 230     | 100   | 200     | 100   | 224     | 100   | 198     | 100   |
| Conductividad elec  | 2.0                  | 151     | 80.64 | 538    | 49.89 | 202     | 72.22 | 221     | 69.80 | 210     | 71.17 | 222     | 69.68 |
| Alcalinidad         | 1.0                  | 80      | 46.47 |        |       | 94      | 45.10 | 102     | 44.42 | 102     | 44.42 | 90      | 45.47 |
| Dureza total        | 1.0                  | 64      | 72.89 |        |       | 90      | 65.67 | 94      | 64.63 | 87      | 66.47 | 88      | 66.20 |
| Fosfatos totales    | 2.0                  | 0.40    | 52.15 |        |       | 0.25    | 64.74 | 1.21    | 31.34 | 2.13    | 24.16 | 1.77    | 26.31 |
| Cloruros            | 0.5                  | 8       | 76.10 |        |       | 10      | 72.41 | 12      | 69.52 | 12      | 69.52 | 12      | 69.52 |
| Oxígeno disuelto    | 5.0                  | 6.6     | 89.19 | 0.0    | 0.00  | 6.2     | 82.67 | 2.0     | 26.67 | 3.0     | 40.00 | 4.8     | 64.00 |
| DBO                 | 5.0                  | 4       | 100   | 200    | 84.01 | 12      | 100   | 28      | 96.37 | 22      | 97.46 | 16      | 98.79 |
| ΣWI                 | 19.0                 | 1563.55 |       | 619.83 |       | 1535.51 |       | 1164.45 |       | 1225.34 |       | 1338.60 |       |
| I                   |                      | 82.29   |       | 47.68  |       | 80.82   |       | 61.29   |       | 64.49   |       | 70.45   |       |

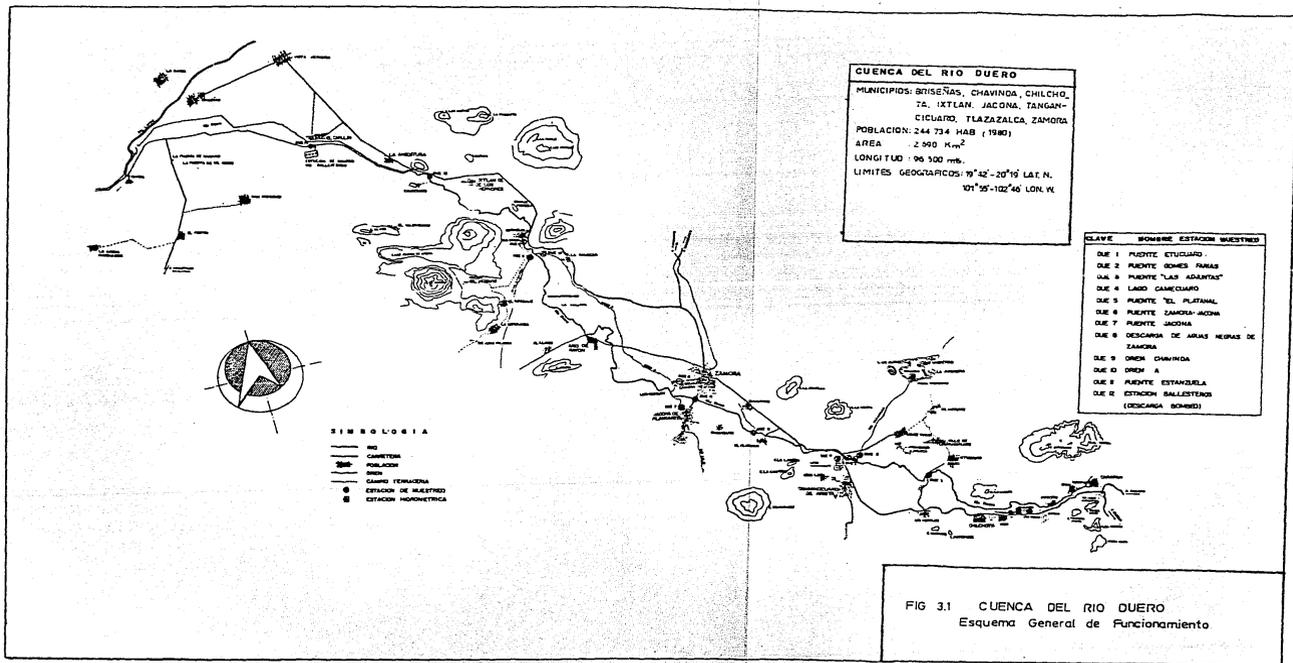
CUADRO 3.25  
INDICE DE CALIDAD PARA RIEGO

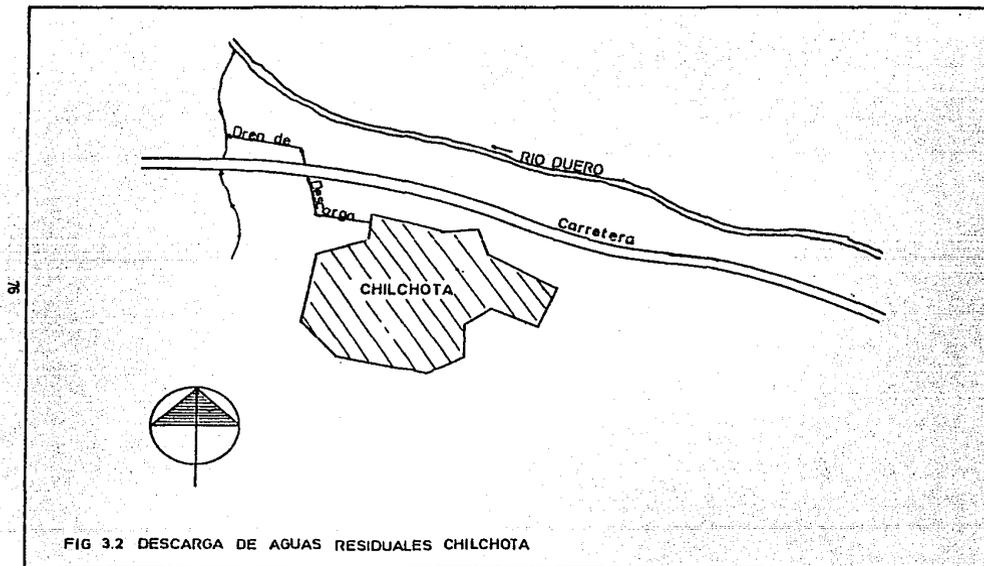
| ESTACION | Na | Ca | Mg | CE  | RAS  | CLASIFICACION |
|----------|----|----|----|-----|------|---------------|
| DUE 1    | 14 | 13 | 12 | 139 | 3.36 | C.S.          |
| DUE 3    | 11 | 16 | 9  | 143 | 3.11 | C.S.          |
| DUE 5    | 12 | 15 | 9  | 144 | 3.46 | C.S.          |
| DUE 6    | 14 | 17 | 7  | 156 | 4.04 | C.S.          |
| DUE 7    | 14 | 16 | 6  | 151 | 4.22 | C.S.          |
| DUE 9    | 15 | 21 | 9  | 202 | 3.87 | C.S.          |
| DUE 10   | 18 | 21 | 11 | 221 | 4.50 | C.S.          |
| DUE 11   | 23 | 23 | 7  | 210 | 5.94 | C.S.          |
| DUE 12   | 16 | 18 | 10 | 222 | 4.28 | C.S.          |

CUADRO 3.26

RESUMEN HIDRAULICO DE APORTACIONES Y EXTRACCIONES EN EPOCAS DE ESTIAJE Y MUESTREO EN EL RIO DUERO

| KILOMETRAJE | ACCION        | DESCRIPCION                            | OPERACION GASTOS     |          | GASTOS RESULTANTES  |          |
|-------------|---------------|--|----------------------|----------|---------------------|----------|
|             |               |  | (m <sup>3</sup> /S.) |          | (m <sup>3</sup> /S) |          |
|             |               |  | ESTIAJE              | MUESTREO | ESTIAJE             | MUESTREO |
| 0+000       | Inicio río    | Manantiales Carapan                    |                      |          |                     |          |
| 14+000      | Ier. muestreo | Puente                                 | 4.20                 | 5.60     | 4.20                | 5.60     |
| 20+700      | Afluente      | A. El Etucuaró                         | 0.10                 | 0.60     | 4.30                | 6.20     |
| 21+700      | Afluente      | Río Tlazazalca                         | 0.00                 | 1.50     | 4.30                | 7.70     |
| 22+000      | Muestreo      | Puente Adjuntas                        | 4.30                 | 7.70     | 4.30                | 7.70     |
| 22+500      | Afluente      | Lago Camécuaro                         | 1.00                 | 1.80     | 5.30                | 9.50     |
| 23+000      | Salida        | Canal Platanal y Santiaguillo          | -2.00                | -5.60    | 3.30                | 3.90     |
| 28+800      | Descarga      | Turbinas hdr. Platanal                 | 1.85                 | 5.20     | 5.15                | 9.10     |
| 29+000      | Salida        | Canal Chaparraco y C. Tamandaro        | -0.91                | -3.16    | 4.24                | 5.94     |
| 35+000      | Muestreo      | Puente Zamora-Jacona                   | 4.24                 | 5.94     | 4.24                | 5.94     |
| 37+000      | Afluente      | Río Celio                              | 0.16                 | 1.30     | 4.40                | 7.24     |
| 37+600      | Salida        | Dren "A"                               | -1.50                | -2.00    | 2.90                | 5.24     |
| 38+400      | Descarga      | Aguas residuales de Zamora al Dren "A" | 0.40                 | 0.40     | -                   | -        |
| 52+000      | Salida        | C. Saco de agua y C. El Llano          | -2.10                | -4.37    | 0.80                | 0.87     |
| 59+700      | Descarga      | Dren "A"                               | 2.80                 | 6.45     | 3.60                | 7.32     |
| 59+750      | Descarga      | Dren Chavinda                          | 0.10                 | 1.20     | 3.70                | 8.52     |
| 61+300      | Muestreo      | Estanzuela-San Simón                   | 3.70                 | 8.52     | 3.70                | 8.52     |
| 61+400      | Salida        | C. El Cerro y otras                    | -0.90                | -1.35    | 2.80                | 7.17     |
| 74+500      | Muestreo      | Puente Ingñieros                       | 2.80                 | 7.17     | 2.80                | 7.17     |





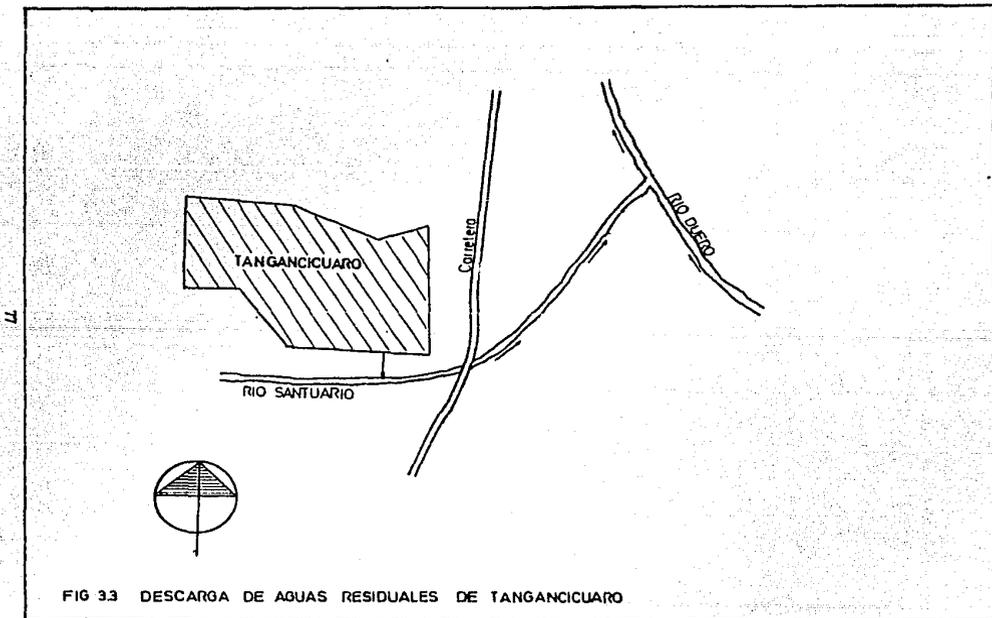


FIG 3.4 DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE ZAMORA

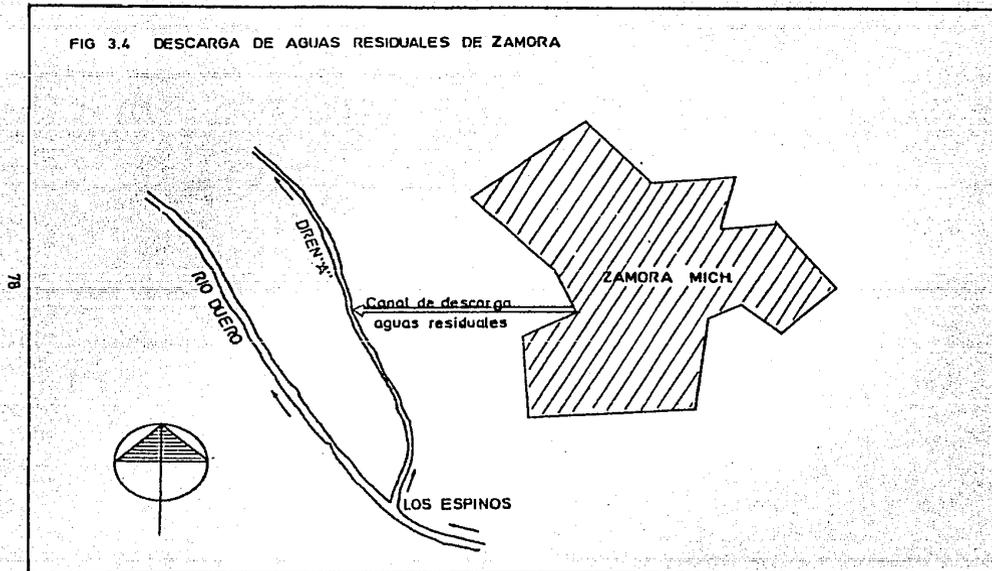


FIG 3.5 DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES DE JACONA

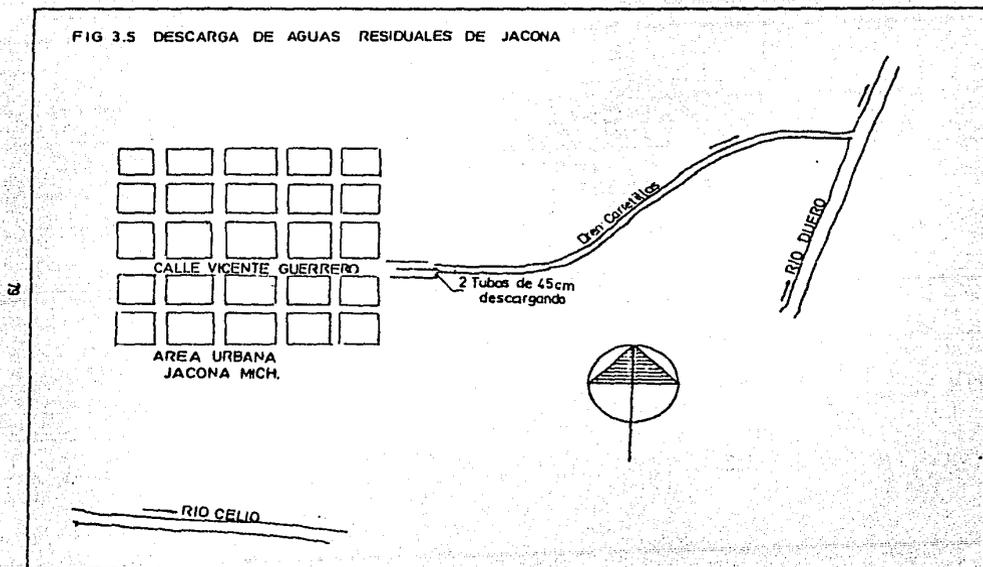


FIG 3.6 CROQUIS DE LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO DEL RIO DUERO

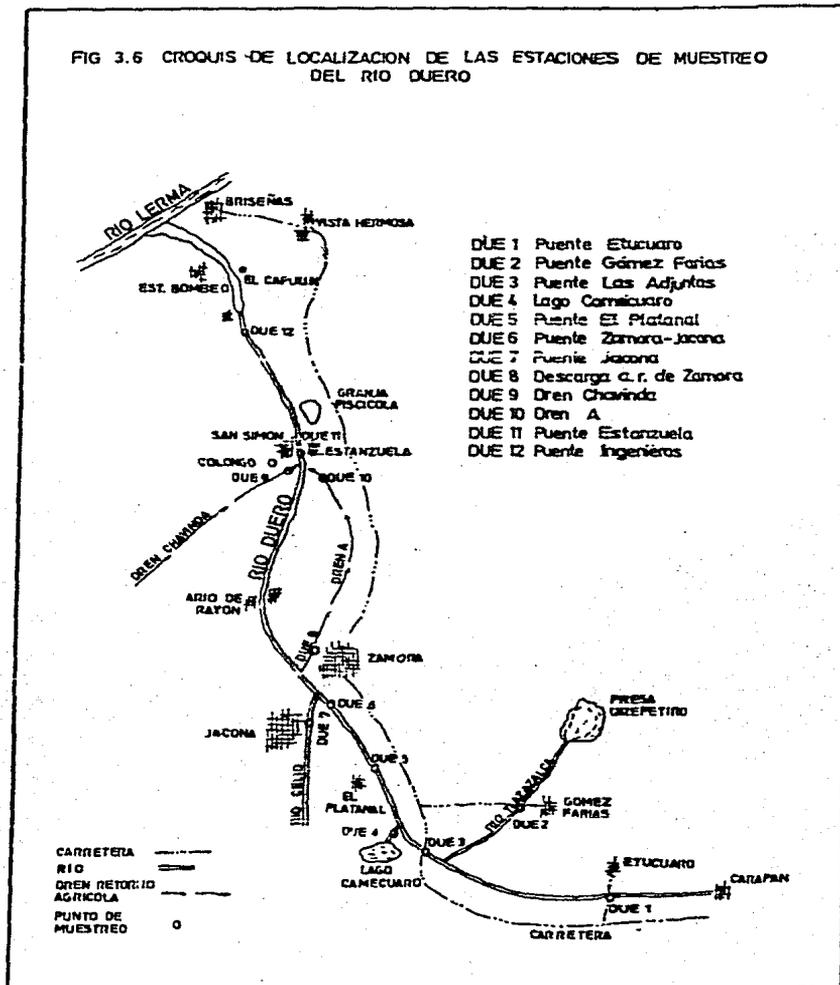


FIG. 3.7 DIAGRAMA PARA DEFINIR LA CALIDAD DEL AGUA PARA RIEGO AGRICOLA

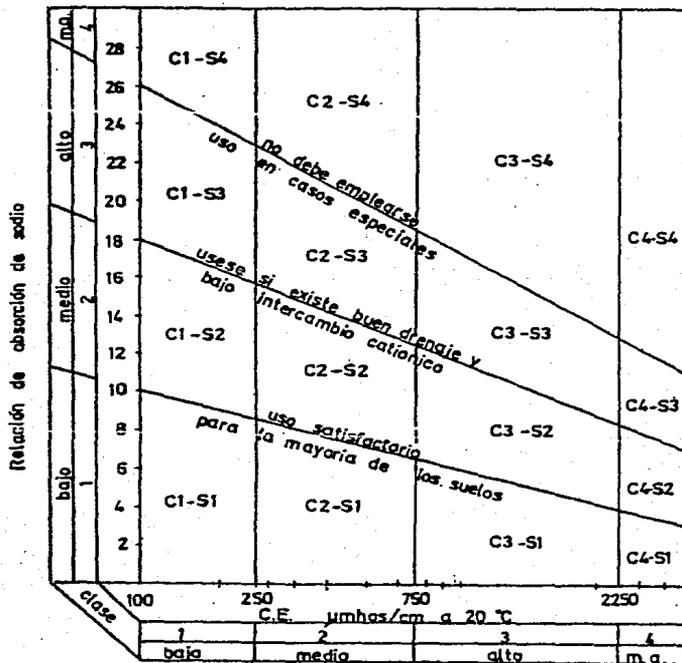
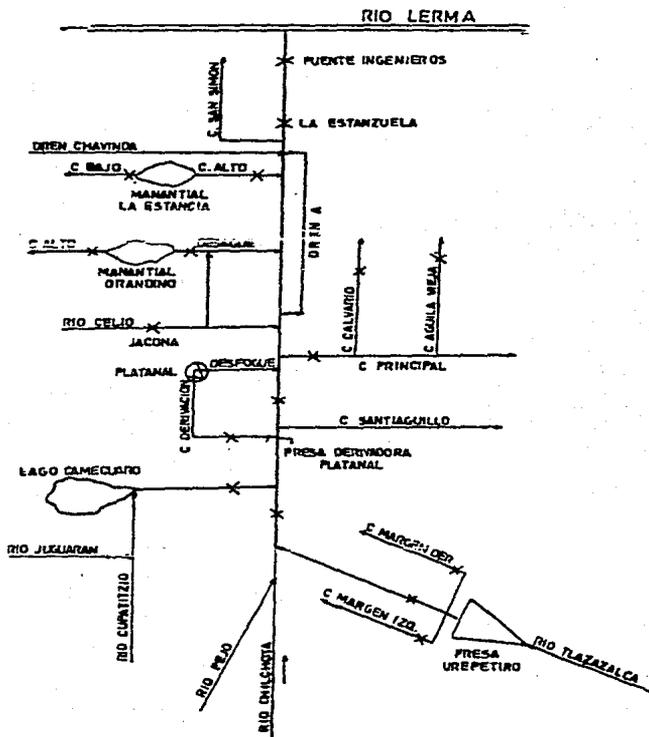


FIG 3.8 ESQUEMA DE DISTRIBUCION HIDRAULICA EN EL RIO DUERO



EST. HODROMETRICA X

## CAPITULO IV

### MODELO MATEMATICO DE LA VARIACION DE LA CALIDAD EN CORRIENTES

#### 4.1 AUTOPURIFICACION DEL AGUA

La naturaleza provee al agua que ha sido contaminada por la acción de desechos, ya sean debidos a escurrimientos del suelo, aguas residuales o desperdicios industriales, de elementos para su autopurificación.

Cuando los contaminantes domésticos y similares se descargan en el agua, se produce una sucesión de cambios en la calidad de la misma. Si los contaminantes se vacían a un lago en el que las corrientes próximas a la descarga sean lentas y cambien de dirección con el viento, los cambios ocurren en forma paulatina, su localización se desplaza esporádicamente y por tanto hay mucha sobreposición, no encontrándose definido claramente el patrón de cambio resultante. Por otra parte, si el agua se aleja a un ritmo uniforme de la descarga, como en una corriente, los cambios sucesivos se propagan a diferentes distancias en el río y establecen un perfil de contaminación y purificación natural tan bien definido que se le puede formular matemáticamente con buen éxito. Sin embargo, no existe un patrón fijo en la mayor parte de las corrientes, sino que dicho patrón cambia longitudinalmente hacia arriba y abajo de la corriente acuática y se modifica en intensidad con los cambios de estación e hidrografía.

Cuando se vierte una carga única y fuerte de materia orgánica putrescible a una corriente limpia, el agua se enturbia, la luz solar no puede llegar a las profundidades y mueren las plantas verdes que, mediante la fotosíntesis, remueven el bióxido de carbono de las aguas y les proporcionan oxígeno. Los organismos que se alimentan de desperdicios aumentan hasta equilibrar el --

abastecimiento de alimentos; la intensidad de sus actividades vitales se refleja en la magnitud de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se utiliza en gran escala las reservas de oxígeno presentes en el agua. El nitrógeno, carbono, azufre, fósforo y otros elementos nutritivos importantes atraviesan sus ciclos naturales, y las sucesivas poblaciones microbianas descomponen las materias de desecho que se han agregado, las sustancias contaminantes naturales presentes en las aguas o que se han agregado a ellas, y al alimento que se haya puesto en disponibilidad por la destrucción de las plantas verdes y de otros organismos que no resistan la contaminación.

El efecto inicial de la contaminación sobre una corriente tiende a degradar la calidad física del agua. Conforme la descomposición se activa, se produce biológicamente un cambio hacia la degradación química; al mismo tiempo, se hace evidente la degradación biológica en términos del número, variedad y organización de los seres vivientes que persisten o que hacen su aparición. En el curso del tiempo y flujo, se utilizan los valores energéticos de una carga única de sustancias contaminantes, disminuye la demanda bioquímica de oxígeno y la velocidad de absorción de oxígeno de la atmósfera, que al principio se encontraba retrasada respecto a la velocidad de utilización del oxígeno, se empareja con ella y finalmente la sobrepasa. El agua se aclara, las plantas verdes se desarrollan nuevamente y proporcionan oxígeno al agua durante la fotosíntesis, reaparecen otros organismos acuáticos superiores, incluyendo los peces de pesca deportiva -- que son notablemente sensibles a la contaminación, completándose finalmente en forma gradual la autopurificación de las aguas de la corriente.

El grado de contaminación y de purificación natural se puede medir física, química y biológicamente, aunque ninguna medida única de referencia puede hacerlo. Dependiendo de la naturaleza de las sustancias contaminantes y de los usos que el cuerpo re--

ceptor de agua vaya a satisfacer, se pueden hacer mediciones de turbidez, color, olor, nitrógeno en sus varias formas, fósforo, DBO, materia orgánica, OD y otros gases, sustancias minerales - de muchas clases, bacterias y otros microorganismos, y la composición de la flora y fauna acuática mayores. Para trazar el perfil de la contaminación y la purificación natural en que puede basarse el cálculo de ingeniería sobre las cargas contaminantes permisibles, se confía en el OD y la DBO tomadas en conjunto; la DBO identifica de una manera completa la carga degradable agregada al agua receptora o que permanece en ella en cualquier tiempo dado; el OD identifica la capacidad del cuerpo de agua para asimilar la carga impuesta por sí misma o con la ayuda de la reaeración mediante el oxígeno absorbido principalmente desde la atmósfera.

#### 4.2 DESOXIGENACION POR ACCION DE LA MATERIA ORGANICA CARBONOSA

Los organismos terrestres extraen su oxígeno de la atmósfera, los organismos acuáticos lo obtienen del oxígeno disuelto en el agua. Debido a que el agua contiene solamente cerca de 0.8% en volumen a temperaturas normales de 50°F (10°C), mientras que la atmósfera contiene alrededor de 21% en volumen, el medio acuático es inherente y críticamente sensible a las demandas de oxígeno que lo pueblan. Por consiguiente, la determinación del oxígeno disuelto en el agua (OD), en relación con su valor de saturación y de la cantidad y velocidad de la utilización del oxígeno (DBO), proporciona un medio rápido y útil para identificar el estado de contaminación del agua e indirectamente también la cantidad de materia orgánica sujeta a descomposición contenida en esta en un tiempo determinado.

Como se muestra en la figura 4.1 el ejercicio progresivo de la DBO del agua recientemente contaminada varía tanto con el tiempo como con la temperatura; a mayor temperatura es más activa la descomposición, y a menor temperatura la misma cantidad -

de materia orgánica se va descomponiendo más lentamente, consumiéndose por tanto menor cantidad de oxígeno.

En la curva típica se marcan dos etapas: la primera presenta la descomposición de la materia orgánica carbonosa, la segunda muestra como tiene lugar la nitrificación. Por ejemplo, si la temperatura del agua recientemente contaminada es de 20°C, la primera etapa se extiende aproximadamente hasta el décimo día; en la segunda etapa subsecuente, la DBO aumenta bruscamente conforme la nitrificación se convierte en dominante.

Es importante conocer la utilización progresiva que hacen del oxígeno las sustancias contaminantes, cuando menos por tres razones:

- 1) Como una medida generalizada de la cantidad de materia oxidable contenida en el agua, o de la carga de contaminación colocada sobre ella.
- 2) Como un medio para predecir el progreso de la descomposición aeróbica en las aguas contaminadas y del grado alcanzado de autopurificación en determinados intervalos de tiempo.
- 3) Como una escala comparativa de la remoción de materia putrescible que acompaña a los diferentes procesos de tratamiento.

Por otro lado, la demanda de oxígeno de las aguas contaminadas tiene su origen en tres factores:

- 1) Materiales orgánicos carbonosos que son usados como alimento por organismos aerobios.
- 2) Materiales nitrogenados oxidables derivados de compuestos de nitritos, amoníaco y nitrógeno orgánico, y que son usados como alimento por determinadas clases de bacterias.

3) Compuestos químicos reductores como hierro ferroso, sulfito y sulfuros que reaccionan con el oxígeno molecular disuelto.

Cuando se manejan aguas residuales domésticas crudas o tratadas, la demanda de oxígeno se debe a la primera clase de organismos.

Sin embargo, sólo la primera fase o etapa del ejercicio -- progresivo de la DBO parece reproducirse a sí misma suficientemente bien para que se generalice en términos matemáticos.

La primera etapa de la DBO se apega a una ley matemática - exponencial en que la velocidad de consumo de oxígeno en cualquier instante es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica oxidable presente.

Esta es una reacción de primer orden en donde la velocidad de reacción depende exclusivamente de la concentración de materia orgánica, o sea:

$$\frac{dy}{dt} = k(L - y) \quad (4.1)$$

en donde:

- dy/dt = velocidad de consumo de oxígeno al tiempo t
- k = constante de velocidad de reacción
- L = demanda máxima de oxígeno de la primera etapa, también denominada demanda última de oxígeno DBO<sub>u</sub>
- y = demanda de oxígeno ejercida en el tiempo t, o cantidad de materia orgánica oxidada (representada en forma de DBO) en un tiempo t.

Se ha visto que es más sencillo determinar la cantidad de oxígeno que se está consumiendo en un cierto momento, que conocer la materia orgánica que se tiene.

Según la figura 4.2, la reacción de primer orden se puede describir en la siguiente forma:

$$\frac{dy}{dt} = ky' \quad (4.2)$$

en donde:

$y'$  = cantidad de materia orgánica oxidable presente en el tiempo  $t$ , o cantidad de oxígeno que falta por consumirse, o sea:

$$y' = L - y$$

Sustituyendo el valor de  $y'$  en la ec. (4.2)

$$\frac{dy}{dt} = k(L - y)$$

integrando esta ec. entre los límites  $y = 0$ , en  $t = 0$ ;  $y = y$  en  $t = t$

$$\int_0^y \frac{dy}{L-y} = k \int_0^t dt$$

$$-\ln(L-y) \Big|_0^y = kt \Big|_0^t$$

$$-\ln(L-0) + \ln(L-y) = k(0 - t)$$

$$\ln \left( \frac{L-y}{L} \right) = -kt$$

$$\frac{L-y}{L} = e^{-kt}$$

$$L - y = Le^{-kt}$$

finalmente,

$$y = L(1 - e^{-kt}) \quad (4.3)$$

ec. que proporciona la demanda de oxígeno ejercida en el tiempo  $t$ .

### 4.3 REOXIGENACION ATMOSFERICA.

Aparte del oxígeno desprendido por las plantas verdes durante la fotosíntesis, el oxígeno disuelto en las corrientes o en otras masas de agua se obtiene, en la naturaleza, de la atmósfera superyacente. Aún cuando la fotosíntesis puede poner en disponibilidad cantidades considerables de oxígeno, la oxigenación de las plantas verdes se encuentra confinada a: las aguas que no están tan fuertemente contaminadas para que las plantas verdes se mueran, las aguas que se han recuperado suficientemente para restablecer el crecimiento de las plantas, las horas en que hay luz solar y las estaciones más calientes del año. Durante la noche, las plantas acuáticas substraen oxígeno del agua y le proporcionan bióxido de carbono, el resultado es un ciclo diurno de oxígeno y bióxido de carbono disueltos dentro de las aguas ricas en vegetación, sin embargo, a pesar de la importancia que tiene esta fuente de oxígeno en la economía total de oxígeno de las aguas naturales, generalmente no se le incluye en los cálculos del balance de oxígeno de las mismas, sino que sólo se toma en cuenta el oxígeno absorbido de la atmósfera en la interfaz agua-oxígeno.

La velocidad con que el agua no saturada con oxígeno absorbe este gas de la atmósfera, es proporcional a su grado de déficit de saturación, o sea:

$$\frac{dC}{dt} = k_g(C_s - C_t) \quad (4.4)$$

en donde:

- $dC/dt$  = cambio de concentración al tiempo  $t$
- $k_g$  = constante de solución o transferencia del gas en condiciones de exposición.
- $C_s$  = valor de saturación a una temperatura y presión atmosférica dadas.
- $C_t$  = concentración al tiempo  $t$ .

integrando esta ec. entre los límites  $C_0$  en  $t = 0$ ;  $C_t$  en  $t = t$

$$\int_{C_0}^{C_t} \frac{dC}{C_S - C} = k_g \int_0^t dt$$

$$-\ln(C_S - C) \Big|_{C_0}^{C_t} = k_g t \Big|_0^t$$

$$-\ln(C_S - C_t) + \ln(C_S - C_0) = k_g(0 - t)$$

$$\ln\left(\frac{C_S - C_t}{C_S - C_0}\right) = -k_g t$$

$$\frac{C_S - C_t}{C_S - C_0} = e^{-k_g t}$$

$$C_S - C_t = (C_S - C_0) e^{-k_g t} \quad (4.5)$$

Si se opta por denominar

$$C_S - C_0 = D_0$$

$$C_S - C_t = D$$

$$k_g = r$$

en donde:

$D_0$  = déficit inicial de OD

$D$  = déficit después del tiempo  $t$

$r$  = velocidad de reoxigenación del cuerpo de agua

por lo tanto la ec. (4.5) se puede escribir:

$$D = D_0 e^{-rt} \quad (4.6)$$

en la que la variación con respecto al tiempo será:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{d}{dt} (D_0 e^{-rt})$$

$$\frac{dD}{dt} = -rD_0 e^{-rt}$$

finalmente,

$$\frac{dD}{dt} = -rD \quad (4.7)$$

El valor de  $r$  no sólo es función de la temperatura del agua, sino también del área de contacto aire-agua en relación con el volumen de agua.

#### 4.4 BALANCE DE OXIGENO DISUELTTO.

La interrelación de la desoxigenación de las aguas contaminadas (DBO) y su reoxigenación o reaereación, a partir de la atmósfera, crea un perfil en forma de cuchara del déficit de oxígeno disuelto a lo largo del recorrido del agua. Este perfil se denomina retardo de oxígeno disuelto.

Las propiedades matemáticas generales de la curva de retardo, que sirven de base para los cálculos de ingeniería de la carga de contaminación permisible de las aguas receptoras, se formulan en los estudios de Streeter y Phelps.

La ecuación diferencial básica para la acción combinada de la desoxigenación y la reaereación establece que la velocidad neta del cambio en el déficit de oxígeno disuelto ( $dD/dt$ ) es igual a la diferencia entre la velocidad de utilización del oxígeno por la DBO en ausencia de reaereación (ec. 4.1) y la velocidad de absorción por la reaereación en ausencia de DBO (ec. 4.7), o sea:

$$\frac{dD}{dt} = k(L - y) - rD \quad (4.8)$$

En la figura 4.3 se muestra la curva resultante de las dos acciones.

De la ec. (4.3)

$$y = L - Le^{-kt}$$

sustituyendo en la ec. (4.8)

$$\frac{dD}{dt} = kL - k(L - Le^{-kt}) - rD$$

$$\frac{dD}{dt} = kL - kL + kLe^{-kt} - rD$$

$$\frac{dD}{dt} = kLe^{-kt} - rD$$

o sea:

$$\frac{dD}{dt} + rD = kLe^{-kt} \quad (4.9)$$

Esta es una ecuación diferencial ordinaria lineal no homogénea de primer orden de la forma:

$$\frac{dD}{dt} + P(t)D = q(t)$$

cuya ecuación diferencial homogénea asociada es:

$$\frac{dD}{dt} + rD = 0 \quad (4.10)$$

la cual puede ser resuelta separando las variables e integrando como se muestra a continuación:

$$\frac{dD}{D} = -r dt$$
$$\int \frac{dD}{D} = -r \int dt$$

$$\ln D + C_1 = -rt + C_2$$

$$\ln D = -rt + C_3$$

aplicando antilogaritmo a ambos miembros

$$D = e^{-rt + C}$$

$$D = e^{-rt} e^C$$

$$D = Ce^{-rt} \quad (4.11)$$

la función (4.11) es la solución general de la ecuación (4.10).

La solución de la ecuación (4.9) se obtiene a partir de la solución de la ecuación homogénea asociada, cambiando la constante arbitraria "C" por una función de la variable independiente  $g(t)$ , esto es:

$$D = g(t)e^{-rt} \quad (4.12)$$

para que esta expresión sea solución de (4.9) la debe satisfacer, por lo tanto derivando la ecuación (4.12)

$$\frac{dD}{dt} = -rg(t)e^{-rt} + \frac{dg(t)}{dt} e^{-rt}$$

sustituyendo la solución propuesta y su derivada en (4.9)

$$-rg(t)e^{-rt} + \frac{dg(t)}{dt} e^{-rt} + rg(t)e^{-rt} = kLe^{-kt}$$

de donde:

$$\frac{dg(t)}{dt} = kLe^{-kt} e^{rt}$$

integrando

$$\int dg(t) = \int kL e^{(r-k)t} dt$$

$$g(t) = \frac{kL}{r-k} \int e^{(r-k)t} (r-k) dt$$

$$g(t) = \frac{kL}{r-k} e^{(r-k)t} + C$$

sustituyendo en la solución propuesta (4.12)

$$D = \left[ \frac{kL}{r-k} e^{(r-k)t} + C \right] e^{-rt}$$

$$D = \frac{kL}{r-k} e^{-kt} + Ce^{-rt} \quad (4.13)$$

que es la solución general de la ecuación diferencial no homogénea (4.9). Para obtener la solución particular es necesario evaluar la constante que aparece en la solución general, para lo cual se establece la condición de que en el tiempo  $t = 0$ ,  $D = D_0$  en el punto de descarga o de referencia, por lo tanto, de (4.13)

$$D_0 = \frac{kL}{r-k} e^0 + Ce^0$$

$$D_0 = \frac{kL}{r-k} + C$$

$$C = D_0 - \frac{kL}{r-k} \quad (4.14)$$

sustituyendo el valor de C en (4.13)

$$D = \frac{kL}{r-k} e^{-kt} + \left( D_0 - \frac{kL}{r-k} \right) e^{-rt}$$

$$D = \frac{kL}{r-k} e^{-kt} - \frac{kL}{r-k} e^{-rt} + D_0 e^{-rt}$$

$$D = \frac{kL}{r-k} (e^{-kt} - e^{-rt}) + D_0 e^{-rt} \quad (4.15)$$

Esta ecuación se puede utilizar para encontrar cualquier punto sobre la curva de retardo de oxígeno y es conocida como la ecuación de Streeter y Phelps, en donde:

D = déficit de oxígeno disuelto en el tiempo t,  
en mg/l

- $D_0$  = déficit inicial ( $t = 0$ ), refiriéndose al límite de saturación, el cual depende de la temperatura en mg/l
- $L$  = DBO última en el punto inicial, en mg/l
- $k$  = constante de desoxigenación, en 1/día
- $r$  = constante de reoxigenación, en 1/día
- $t$  = tiempo, en día.

La relación de  $r$  a  $k$  es una constante de autopurificación de la corriente.

$$f = \frac{r}{k} \quad (4.16)$$

sustituyendo este valor en la ecuación (4.15) y simplificando

$$D = \frac{L}{f-1} e^{-kt} \left\{ 1 - e^{-(f-1)kt} \left[ 1 - (f-1) \frac{D_0}{L} \right] \right\} \quad (4.17)$$

Como un concepto de ingeniería, la curva de retardo posee dos puntos característicos que son:

1) Un punto crítico, correspondiente al déficit máximo de coordenadas  $(t_c, D_c)$ , el cual se define por la condición  $dD/dt = 0$  y  $d^2D/dt^2 < 0$ .

2) Un punto de inflexión, que señala dónde las aguas recuperan el oxígeno con mayor rapidez, de coordenadas  $(t_i, D_i)$ , el cual se define por la condición  $d^2D/dt^2 = 0$ .

Efectuando las derivaciones y transformaciones respectivas, resulta de la ecuación (4.17)

Para el punto crítico:

$$t_c = \frac{1}{k(f-1)} \ln \left\{ f \left[ 1 - (f-1) \frac{D_0}{L} \right] \right\} \quad (4.18)$$

$$D_c = \frac{L}{f} e^{-kt_c} \quad (4.19)$$

Para el punto de inflexión:

$$t_i = \frac{1}{k(f-1)} \ln \left\{ f^2 \left[ 1 - (f-1) \frac{D_0}{L} \right] \right\} \quad (4.19)$$

$$D_i = \frac{f-1}{f^2} L e^{-kt_i} \quad (4.20)$$

Las coordenadas de estos dos puntos están relacionadas entre sí por:

$$t_i - t_c = \frac{\ln f}{k(f-1)} \quad (4.21)$$

$$\frac{D_i}{D_c} = \frac{f-1}{f} e^{-k(t_i - t_c)} \quad (4.22)$$

En las aguas residuales la solubilidad del oxígeno es aproximadamente el 95% respecto al de las aguas dulces, pero para problemas comunes se toman los valores que se obtendrían para aguas dulces. En el cuadro 4.1 se presentan los valores de saturación del oxígeno en agua dulce al nivel del mar bajo una presión atmosférica de 760 mm. de mercurio, con 20.9% de oxígeno. Para altitudes distintas al nivel del mar, se considera que la solubilidad es directamente proporcional a la presión. En el cuadro 4.2 se proporciona la relación de altitud con valores de columna de mercurio.

#### 4.5 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE DESOXIGENACION

La evaluación práctica de la ecuación (4.3) se complica por el hecho de que tanto L como k, generalmente se desconocen. Se ha propuesto una serie de métodos para encontrar las magnitudes de L y de k a partir de un conjunto de observaciones de y (DBO) y de t, entre estos se tiene:

- 1) Método de los momentos de Moore, Thomas y Snow.

Este método ajusta los valores medidos con una curva de pri-

mer orden que tiene sus primeros dos momentos  $\sum y$  ;  $\sum ty$ , iguales a los de los puntos experimentales. Las ecuaciones que expresan esta condición para una serie de valores  $n$  de  $y$ , en una secuencia cualquiera especificada de tiempo, en la que  $i$  denota el orden numérico de la secuencia son:

$$\sum_{i=0}^n y_i = \sum_{i=0}^n L(1 - e^{-kt_i}) = (n+1)L - L \sum_{i=0}^n e^{-kt_i} \quad (4.23)$$

$$\sum_{i=0}^n t_i y_i = \sum_{i=0}^n L t_i (1 - e^{-kt_i}) = L \sum_{i=0}^n t_i - L \sum_{i=0}^n (t_i e^{-kt_i}) \quad (4.24)$$

eliminando el término  $y_0 = 0$ ,  $t_0 = 0$ , se tiene

$$\sum_{i=1}^n y_i = nL - L \sum_{i=1}^n e^{-kt_i}$$

$$\sum_{i=1}^n t_i y_i = L \sum_{i=1}^n t_i - L \sum_{i=1}^n (t_i e^{-kt_i})$$

dividiendo los momentos se elimina a  $L$  para dar la ecuación

$$\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n t_i y_i} = \frac{n - \sum_{i=1}^n e^{-kt_i}}{\sum_{i=1}^n t_i - \sum_{i=1}^n t_i e^{-kt_i}} \quad (4.25)$$

en la que la magnitud del miembro del lado derecho se puede calcular para todos los diferentes valores de  $k$  y en secuencias variables de tiempo, es decir, se obtienen diferentes valores de -

$$\sum y_i / \sum t_i y_i$$

Dividiendo la ecuación (4.23) entre  $L$ , se obtiene

$$\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{L} = n - \sum_{i=1}^n e^{-kt_i}$$

en la que el término del lado derecho es igual al numerador del término del lado derecho de la ecuación (4.25), por lo que es posible obtener diferentes valores de  $\sum y_i / L$ .

Haciendo lo anterior se pueden obtener dos curvas para una secuencia cualquiera especificada de tiempo, las cuales permiten conocer posteriormente los valores de  $k$  y  $L$ .

En la figura 4.4 se presentan las curvas para una secuencia de cinco días.

## 2) Método simplificado de Thomas Jr.

Thomas Jr. ha propuesto una aproximación gráfica simple para la evaluación de la constante  $k$ , su método se basa en la similitud de las funciones

$$1 - e^{-kt} = kt[1 - kt/2 + (kt)^2/6 - (kt)^3/24 + \dots]$$

$$kt(1 + kt/6)^{-3} = kt[1 - kt/2 + (kt)^2/6 - (kt)^3/21.6 + \dots]$$

La ecuación (4.3) puede, por consiguiente, aproximarse por la ecuación

$$y = Lkt(1 + kt/6)^{-3} \quad (4.26)$$

reordenando:

$$\frac{y}{Lkt} = (1 + kt/6)^{-3}$$

$$\left(\frac{y}{Lkt}\right)^{-1/3} = 1 + kt/6$$

$$\left(\frac{y}{t}\right)^{-1/3} = (1 + kL)^{1/3} (1 + kt/6)$$

$$(t/y)^{1/3} = (kL)^{-1/3} (1 + kt/6)$$

finalmente

$$(t/y)^{1/3} = (kL)^{-1/3} + (k^2/3/6L^{1/3})t$$

que es la ecuación de una recta de la forma

$$p = a - bq$$

Si se traza  $(t/y)^{1/3}$  como ordenada contra  $t$  como abscisa, - el valor de la intersección sobre la ordenada a  $t=0$  de la línea-recta ajustada visualmente es:

$$a = (kL)^{-1/3} \quad (4.27)$$

y el valor de la pendiente de esta línea es:

$$b = k^{2/3}/6L^{1/3} \quad (4.28)$$

en donde

$$\frac{6b}{a} = \frac{6k^{2/3}/6L^{1/3}}{(kL)^{-1/3}}$$

desarrollando

$$\frac{6b}{a} = \frac{6k^{2/3}(kL)^{1/3}}{6L^{1/3}}$$

finalmente

$$k = 6b/a$$

despejando  $L$  de la ecuación (4.27)

$$L = 1/ka^3$$

Con este método se debe tener cuidado de no usar valores de  $y$  mayores que  $0.9L$  porque la desviación se hace significativa -- cuando se ha ejercido el 90% de la DBO.

### 3) Método gráfico basado en la remoción de DBO.

Para la aplicación de este método es necesario medir la concentración de la DBO en por lo menos tres puntos de cada segmento, así como la velocidad y kilometraje entre cada uno de ellos. Estos datos se grafican en papel semilogarítmico, teniendo como-

ordenada la DBO y como abscisa al kilometraje. Se ajusta la recta visualmente y se procede al cálculo de la pendiente de la recta y de k como sigue:

$$k = 2.3 \times \text{pend} \times U$$

en donde:

pend = pendiente de la línea recta ajustada visualmente.

U = velocidad en km/día

2.3 = factor de conversión de k de base 10 a base e.

#### 4.6 DETERMINACION DE LA CONSTANTE DE REAERACION

Para determinar el valor de r se han propuesto fórmulas que dan valores aproximados, entre ellas se encuentran:

##### 1) Fórmula de Churchill, Elmore y Buckingham

$$r = 2.18 \frac{U^{0.969}}{H^{1.673}}$$

en donde:

U = velocidad media del agua, en m/s

H = profundidad media, en m

##### 2) Fórmula de O'Connor-Dobbins

$$r = 127 \frac{(D_L U)^{\frac{1}{2}}}{H^{3/2}}$$

en donde:

$D_L$  = difusión del oxígeno en el agua para la temperatura considerada, en  $m^2/día$ .

U = velocidad media del agua, en m/s

H = profundidad media, en m.

$$D_L = 1.78 \times 1.04^{(T-20)} \times 10^{-4}$$

#### 4.7 CORRECCION POR TEMPERATURA

La temperatura es uno de los factores más importantes en cualquier sistema biológico. Los cambios de temperatura producen aumento o reducción en la velocidad de desoxigenación (k), así como en la velocidad de reoxigenación (r).

Tanto la prueba estándar de la DBO como el cálculo de la velocidad de reoxigenación se realizan a una temperatura estándar de 20°C, por consiguiente cuando se requiere conocer las constantes k y r a diferentes temperaturas se emplea la expresión propuesta por Van't Hoff-Arrhenius:

$$\frac{k_t}{k_o} = e^{Ck(T-T_o)} = \theta_k^{(T-T_o)}$$

en donde:

$k_t$  = constante de velocidad de desoxigenación o reoxigenación a una temperatura T.

$k_o$  = constante de velocidad de desoxigenación o reoxigenación bajo condiciones de referencia.

T = temperatura a la que se busca el nuevo valor, en °C

$C_k$  = característica de la temperatura.

$\theta_k$  = coeficiente de la temperatura

Los valores típicos de  $\theta_k$  son:

para k constante de desoxigenación  $\theta_k = 1.047$

para r constante de reoxigenación  $\theta_k = 1.024$

#### 4.8 CORRECCION POR VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO.

Los diferentes volúmenes de escurrimiento afectan a la autpurificación mediante la relación con la velocidad de reoxigena-

ción. Investigaciones llevadas a cabo en relación a lo anterior han dado por resultado la siguiente ecuación:

$$r = aQ^b$$

en donde la tasa de reoxigenación varía directamente proporcional a una constante "a" y en forma potencial a una constante "b" para cada río en especial.

Para obtener las constantes mencionadas se debe contar con un mínimo de tres valores de r, calculados como se mencionó anteriormente, para tres diferentes gastos Q. En esa forma se puede establecer la ecuación:

$$\log r = \log a + b \log Q.$$

Los tres valores diferentes se grafican en papel log-log teniendo como ordenada el valor de r y como abscisa el gasto; se ajusta una recta visualmente y se determinan los valores de la pendiente (b) y de la intersección al eje de las ordenadas (log a) con estos valores se puede determinar el valor de r para diferentes gastos de escurrimiento.

#### 4.9 OTROS FENOMENOS QUE AFECTAN EL MODELO

Existen otros fenómenos que afectan las concentraciones de oxígeno en una corriente. En cada uno de los casos el Ingeniero Ambiental debe de utilizar su criterio y experiencia para incorporarlos a la ecuación general en caso de que estos se presenten en la corriente y sean significativos para el comportamiento de las características de la calidad de la corriente, los fenómenos que se pueden presentar son una remoción de DBO por sedimentación a lo largo del río; una demanda de oxígeno por lodos bentales; una demanda por la materia orgánica nitrogenada; una demanda por acción de la respiración y una adición a través de la fo-

tosíntesis. Estos fenómenos son tratados en forma similar a como se hizo en la sección 4.4

#### 4.9.1 Efecto de la carga bental.

Se llama carga bental a la materia orgánica que se sedimenta en la corriente cuando esta tiene una velocidad menor de 30 cm/s. La sedimentación provoca la formación de los llamados fanos, los cuales se acomodan por estratos cuando además de la lentitud del recorrido existen factores favorables de temperatura y otros de tipo meteorológico.

Aunque la desoxigenación por carga bental puede ser calculada por medio de fórmulas específicas, las magnitudes de las constantes que deben aplicarse no son bien conocidas y por tanto no es común su utilización. A cambio y con buenos resultados se puede usar la siguiente relación aproximada para la determinación de la demanda máxima diaria de oxígeno por carga bental de un sedimento acumulado

$$y_m = 3.14 \times 10^{-2} y_o C_t w \frac{5+160w}{1+160w} \sqrt{t_a}$$

en donde:

$y_m$  = demanda máxima diaria de oxígeno por carga bental. en  $g/m^2$ .

$y_o$  = DBO a 5 días y 20°C en gr/kg de materia volátil.

$C_t$  = factor de temperatura.

$w$  = razón de depósitos diarios de sólidos volátiles, en  $kg/m^2$

$t_a$  = tiempo en días durante los cuales la acumulación tiene lugar, hasta un máximo de 365.

$$C_t = \frac{y}{y_o} = \frac{1-e^{-5k}}{1-e^{-5k_o}}$$

Si parte de la carga contaminante se sedimenta en la vecindad inmediata del punto de descarga, el déficit de oxígeno originado por la carga bental puede calcularse con la ecuación

$$D_b = \frac{y_m}{Hr} (1 - e^{-rt})$$

en donde:

- $D_b$  = déficit originado por la carga bental
- $y_m$  = demanda de lodos bentaes en  $grO_2/m^2$  dfa
- $r$  = constante de reoxigenación.
- $t$  = tiempo en días
- $H$  = profundidad media de la corriente en m

Este término se agrega a la ecuación (4.15)

Si por el contrario, la carga depositada se dispersa a lo largo de un tramo grande del río, se tiene un incremento en la rapidez de desoxigenación; por lo que es necesario ampliar las ecuaciones (4.8) y (4.15), para incluir la velocidad de remoción de DBO por sedimentación, las relaciones que resultan son:

$$\frac{dD}{dt} = kLe^{-(k+d)t} - rD$$

$$D = \frac{kL}{r - (k+d)} (e^{-(k+d)t} - e^{-rt}) + D_0 e^{-rt} \quad (4.29)$$

en donde:

- $d$  = constante de remoción debida a sedimentación.

Cuando hay mucha turbulencia el valor de  $d$  puede ser negativo originándose en lugar de una sedimentación un arrastre, recibiendo la corriente una carga adicional; sin embargo, la turbulencia aumentará la reaereación al mismo tiempo.

Denominando

$$k_r = k - d$$

en donde:

- $k_r$  = constante de remoción de DBO
- $k$  = constante de remoción de DBO por la acción de las bacterias.
- $d$  = constante de remoción de DBO por sedimentación

sustituyendo en la ecuación (4.29), se tiene

$$D = \frac{kL}{r-k_r} (e^{-k_r t} - e^{-rt}) + D_0 e^{-rt} \quad (4.30)$$

#### 4.9.2 Efecto de la materia nitrogenada.

Cuando la demanda de oxígeno se debe además de la materia orgánica carbonosa a la materia nitrogenada, es decir, se presenta la segunda etapa del ejercicio progresivo de la DBO, el déficit de oxígeno ocasionado por la materia nitrogenada se calcula con la expresión:

$$D_n = 4.57 K_n N_o (e^{-k_n t} - e^{-rt}) \quad (4.31)$$

en donde:

- $D_n$  = déficit originado por la materia nitrogenada
- $k_n$  = constante de desoxigenación de la materia orgánica nitrogenada
- $N_o$  = concentración de materia orgánica nitrogenada inicial.
- $t$  = tiempo en días
- $r$  = constante de reoxigenación.

#### 4.9.3 Efecto de la fotosíntesis y de la respiración del plancton.

Cuando estos fenómenos se presentan, el déficit de oxígeno ocasionado por la acción de estos se calcula por la expresión:

$$D_f = \frac{(R-Pa)}{r} (1 - e^{-rt})$$

en donde:

- $D_f$  = déficit de oxígeno por efecto de la fotosíntesis y de la respiración del plancton.
- $R$  = consumo de oxígeno por la respiración de plancton, en mg/l x día.
- $Pa$  = producción máxima de oxígeno por efecto de la fotosíntesis, en mg/l x día.
- $Pa = (2t_p / 24\pi) P_{máx}$
- $r$  = constante de reoxigenación.
- $t$  = tiempo de paso en días
- $t_p$  = tiempo de producción.
- $P_{máx}$  = Producción máxima de oxígeno por efecto de la fotosíntesis.

De esta forma se tiene el modelo más completo al tomar en cuenta los factores de sedimentación de los sólidos y por tanto una remoción de DBO por este concepto a lo largo del río; una demanda de oxígeno por lodos bentales producto de la materia orgánica sedimentada; una demanda de oxígeno por la materia orgánica nitrogenada; una adición de oxígeno por acción de la fotosíntesis y una demanda de oxígeno por la respiración del plancton.

La ecuación general con todos sus términos es:

$$D = D_o e^{-rt} + \frac{kL}{r-k_r} (e^{-k_r t} - e^{-rt}) + \frac{y_m}{Hr} (1 - e^{-rt}) + 4.57k_n N_o (e^{-k_n t} - e^{-rt}) + \frac{(R-Pa)}{r} (1 - e^{-rt})$$

#### 4.10 APLICACION DEL MODELO

Debido a que las descargas de aguas residuales de la ciudad de Zamora, la cual representa la mayor concentración de materia orgánica, vierte al dren "A" el cual tiene una velocidad de ---

aproximadamente 1.0 m/s no se considera sedimentación en el río Duero, por lo que el factor de déficit originado por la carga -bental, así como la remoción de DBO debida a sedimentación, no se consideran en el modelo.

Asimismo, del análisis del tiempo de paso con una velocidad promedio de 0.60 m/s en los primeros 37.6 kms. y de 0.20 m/s en los últimos 37.9 kms, se tiene un tiempo total de 2.92 días, con el cual no se alcanza a ejercer la materia orgánica nitrogenada en el río, la cual necesita de 8 a 10 días para iniciar la nitrificación bacteriana demandante de oxígeno.

En base al análisis anterior, así como a la apreciación particular de que la proliferación del plancton no es significativa para considerar los fenómenos de fotosíntesis y respiración en la concentración del oxígeno disuelto, se tiene que la ecuación aplicable para este caso será:

$$D = \frac{kL}{r-k} (e^{-kt} - e^{-rt}) + D_0 e^{-rt}$$

Esta ecuación se aplica a partir del km. 20.7 en donde recibe la primera descarga de agua residual proveniente de Tangancícuaro a través del arroyo Pejo o El Santuario.

Como entre la descarga del arroyo El Santuario y la descarga de aguas residuales de Zamora, las distancias son cortas entre afluentes y extracciones, la remoción de DBO por las bacterias tiene poca influencia ya que los tiempos de paso son bajos, siendo el mayor de 0.14 días entre la hidroeléctrica y el río -- Celio; por consiguiente el modelo no se aplicará en estos tramos pequeños y sólo se efectuará el balance de masa para determinar la variación del OD a lo largo de este segmento.

Con el fin de aplicar el modelo descrito, es necesario conocer todos los parámetros que lo componen, tales como  $DBO_5$ , OD, K, r, temperatura media, velocidades, tiempo de paso, caracterís

ticas físicas de la corriente y otros valores. Los datos para la aplicación del modelo se muestran en la figura 4.5

#### 4.10.1 Determinación de la concentración de saturación.

Del perfil del río (figura 2.2) y de los cuadros 4.1 y 4.2 se obtiene la concentración de saturación de oxígeno, para los siguientes tramos:

##### 1) Primer tramo.- Etucuario - El Platanal.

Temperatura media = 20°C

Concentración al nivel del mar = 9.17 mg/l (del cuadro 4.1)

Altura media = 1,700 msnm (de la fig. 2.2)

Presión barométrica = 615 mmHg (del cuadro 4.2)

Factor de corrección = 0.81

Concentración de saturación =  $0.81 \times 9.17 = 7.4 \text{ mg/l}$

##### 2) Segundo tramo.- El Platanal - Zamora.

Temperatura media = 20°C

Concentración a nivel del mar = 9.17 mg/l

Altura media = 1,570 msnm

Presión barométrica = 625.4 mmHg

Factor de corrección = 0.823

Concentración de saturación =  $0.823 \times 9.17 = 7.5 \text{ mg/l}$

##### 3) Tercer tramo.- Zamora - San Cristóbal

Temperatura media = 20°C

Concentración a nivel del mar = 9.17 mg/l

Altura media = 1,520 msnm

Presión barométrica = 629.4 mmHg

Factor de corrección = 0.828

Concentración de saturación =  $0.828 \times 9.17 = 7.6 \text{ mg/l}$

#### 4.10.2 Calibración del modelo.

Como se mencionó anteriormente, en el tramo comprendido entre la descarga del arroyo El Santuario y la descarga de aguas residuales de Zamora sólo se efectuará el balance de masa para determinar la variación de OD a lo largo de este segmento.

Para el balance de masa se emplea la ecuación:

$$C_m = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2}$$

en donde

$C_m$  = concentración de la mezcla.

$Q_1$  y  $Q_2$  = gastos de las dos corrientes que confluyen.

$C_1$  y  $C_2$  = concentraciones correspondientes a las corrientes.

1er. balance.- Río Duero - Arroyo El Santuario.

$$DBO = \frac{5.6 \times 2 + 0.6 \times 35}{5.6 + 0.6} = 5.2 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{5.6 \times 6.9 + 0.6 \times 5.8}{5.6 + 0.6} = 6.8 \text{ mg/l}$$

2o. balance.- Río Duero - Río Tlazazalca.

$$DBO = \frac{6.2 \times 5.2 + 1.5 \times 13}{6.2 + 1.5} = 6.7 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{6.2 \times 6.8 + 1.5 \times 5.9}{6.2 + 1.5} = 6.6 \text{ mg/l}$$

3er. balance.- Río Duero - Lago Camécuaro.

$$DBO = \frac{7.7 \times 6.7 + 1.8 \times 2}{7.7 + 1.8} = 5.8 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{7.7 \times 6.6 + 1.8 \times 6.3}{7.7 + 1.8} = 6.5 \text{ mg/l}$$

4o. balance.- Río Duero - Descarga hidroeléctrica.

$$DBO = \frac{3.9 \times 5.8 + 5.2 \times 4.5}{3.9 + 5.2} = 5.0 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{3.9 \times 6.5 + 5.2 \times 6}{3.9 + 5.2} = 6.2 \text{ mg/l}$$

5o. Balance.- Río Duero - Ríc Celio.

$$DBO = \frac{5.94 \times 5.0 + 1.3 \times 4}{5.94 + 1.3} = 4.8 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{5.94 \times 6.2 + 1.3 \times 6.6}{5.94 + 1.3} = 6.3 \text{ mg/l}$$

6o. balance.- Río Duero (Dren "A") - a.r. Zamora

$$DBO = \frac{2.0 \times 4.8 + 0.4 \times 200}{2.0 + 0.4} = 37.3 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{2.0 \times 6.3 + 0.4 \times 0}{2.0 + 0.4} = 5.3 \text{ mg/l}$$

Para aplicar el modelo se consideraron dos tramos, el primero de la descarga de a.r. de Zamora a la estación de muestreo -- DUE 10 y el segundo del Puente Estanzuela (DUE 11) al Puente Ingenieros (DUE 12).

Para el primer tramo se tiene:

$$OD \text{ inicial} = 5.3 \text{ mg/l}$$

$$OD \text{ final} = 2.0 \text{ mg/l}$$

$$OD \text{ Sat.} = 7.6 \text{ mg/l}$$

$$D_o = 7.6 - 5.3 = 2.3 \text{ mg/l}$$

$$D \text{ final} = 7.6 - 2.0 = 5.6 \text{ mg/l}$$

$$DBO_5 \text{ inicial} = 37.3 \text{ mg/l}$$

$$DBO_5 \text{ final} = 26 \text{ mg/l}$$

$$\text{distancia} = 59.7 - 38.4 = 21.3 \text{ km.}$$

$$\text{velocidad media} = 0.55 \text{ m/s} = 47.52 \text{ km/día}$$

tiempo de paso =  $21.3 / 47.52 = 0.45$  día  
 profundidad media = 0.50 m.

Determinación de K

$$K = 2.3 (\log \text{DBO}_5 \text{ inicial} - \log \text{DBO}_5 \text{ final}) \frac{\text{velocidad}}{\text{distancia}}$$

$$K = 2.3 (\log 37.3 - \log 26) \times \frac{47.52}{21.30} = 0.80 \text{ día}^{-1}$$

Determinación de r

$$r = 127 \frac{(\text{DLU})^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} : \quad \text{DL} = 1.78 \times 1.04^{(T-20)} \times 10^{-4}$$

$$\text{DL} = 1.78 \times 10^{-4}$$

$$r = 1.69 \frac{U^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}}$$

$$r = 1.69 \times \frac{0.55^{\frac{1}{2}}}{0.50^{\frac{3}{2}}} = 3.54$$

Ajustando el valor de r

Primer ajuste:

$$D_1 = \frac{0.80 \times 37.3}{3.54 - 0.80} (e^{-0.80 \times 0.45} - e^{-3.45 \times 0.45}) + 2.3 e^{-3.54 \times 0.45} =$$

$$= 3.85$$

Segundo ajuste:

$$D_2 = \frac{0.80 \times 37.3}{3.70 - 0.80} (e^{-0.80 \times 0.45} - e^{-3.70 \times 0.45}) + 2.3 e^{-3.70 \times 0.45} =$$

$$= 5.67$$

Tercer ajuste: r = 3.76

$$D_3 = \frac{0.80 \times 37.3}{3.75 - 0.80} (e^{-0.80 \times 0.45} - e^{-3.76 \times 0.45}) + 2.3 e^{-3.76 \times 0.45} =$$

$$= 5.60$$

Por lo tanto las constantes a usar en el primer tramo son:

$$\begin{aligned} \text{Constante de desoxigenación} \quad K &= 0.80 \text{ dfa}^{-1} \\ \text{Constante de reaeración} \quad r &= 3.76 \text{ dfa}^{-1} \end{aligned}$$

Para el segundo tramo se tiene:

7o. balance.- Río Duero - Dren "A" - Dren Chavinda.

$$\text{DBO} = \frac{0.87 \times 4.8 + 6.45 \times 26 + 1.2 \times 12}{0.87 + 6.45 + 1.2} = 22.9 \text{ mg/l}$$

$$\text{OD} = \frac{0.87 \times 6.3 + 6.45 \times 2.0 + 1.2 \times 6.2}{0.87 + 6.45 + 1.2} = 3.0 \text{ mg/l}$$

$$\text{OD inicial} = 3.0 \text{ mg/l}$$

$$\text{OD final} = 4.8 \text{ mg/l}$$

$$\text{OD sat} = 7.6 \text{ mg/l}$$

$$\text{DO} = 7.6 - 3.0 = 4.6 \text{ mg/l}$$

$$\text{D final} = 7.6 - 4.8 = 2.8 \text{ mg/l}$$

$$\text{DBO}_5 \text{ inicial} = 21.9 \text{ mg/l}$$

$$\text{DBO}_5 \text{ final} = 18.0 \text{ mg/l}$$

$$\text{distancia} = 74.5 - 59.7 = 14.8 \text{ Km.}$$

$$\text{velocidad} = 0.55 \text{ m/s} = 47.52 \text{ Km/día}$$

$$\text{tiempo de paso} = 14.8/47.52 = 0.31 \text{ día}$$

$$\text{profundidad media} = 0.40 \text{ m.}$$

Determinación de K

$$K = 2.3 (\log 21.9 - \log 18) \frac{47.52}{14.80} = 0.63 \text{ dfa}^{-1}$$

Determinación de r

$$r = 1.69 \times \frac{0.55^{\frac{1}{2}}}{0.40^{\frac{3}{2}}} = 4.95$$

Ajustando el valor de r

Primer ajuste:

$$D_1 = \frac{0.63 \times 21.9}{4.95 - 0.63} \times (e^{-0.63 \times 0.31} - e^{-4.95 \times 0.31}) \\ + 4.6 e^{-4.95 \times 0.31} = 2.93$$

Segundo ajuste:  $r = 5.1$

$$D_2 = \frac{0.63 \times 21.9}{5.1 - 0.63} (e^{-0.63 \times 0.31} - e^{-5.1 \times 0.31}) \\ + 4.6 e^{-5.1 \times 0.31} = 2.85$$

Tercer ajuste:  $r = 5.2$

$$D_3 = \frac{0.63 \times 21.9}{5.2 - 0.63} (e^{-0.63 \times 0.31} - e^{-5.2 \times 0.31}) \\ + 4.6 e^{-5.2 \times 0.31} = 2.79$$

Cuarto ajuste:  $r = 5.19$

$$D_4 = \frac{0.63 \times 21.9}{5.19 - 0.63} (e^{-0.63 \times 0.31} - e^{-5.19 \times 0.31}) \\ + 4.6 e^{-5.19 \times 0.31} = 2.80$$

Por lo tanto las constantes a usar en el segundo tramo son:

$$\begin{array}{ll} \text{Constante de desoxigenación} & K = 0.63 \text{ día}^{-1} \\ \text{Constante de reaeración} & r = 5.19 \text{ día}^{-1} \end{array}$$

Para una mayor comprensión en el cuadro 4.3 se calcula el OD para varios puntos y se grafica su valor en la figura 4.6

En la figura 4.6 se observa que los puntos obtenidos por el modelo coinciden casi en su totalidad con los obtenidos en el muestreo, por lo cual se consideran aceptables las constantes utilizadas.

Para obtener el valor de la DBO se utiliza la ecuación:

$$DBO = y' = Le^{-kt}$$

La variación de la DBO se presenta en el cuadro 4.4

Para obtener las coordenadas del punto crítico se emplean las ecuaciones 4.16, 4.18 y 4.19

$$f = r/k \quad (4.16)$$

$$t_c = \frac{1}{k(f-1)} \ln \left\{ f[1-(f-1) \frac{D_c}{L}] \right\} \quad (4.18)$$

$$DL = \frac{L}{f} e^{-k t_c} \quad (4.19)$$

sustituyendo los valores, se obtiene:

$$f = 4.76/0.80 = 4.7$$

$$t_c = \frac{1}{0.80(4.7-1)} \ln \left\{ 4.7[1-(4.7-1) \frac{2.3}{37.3}] \right\} = 0.44 \text{ día}$$

$$D_c = \frac{37.3}{4.7} \times e^{-0.80 \times 0.44} = 5.58 \text{ mg/l}$$

$$OD_c = C_s - D_c = 7.6 - 5.58 = 2.02 \text{ mg/l}$$

el cual se presentará en el kilometraje

$$d = 38.4 + U t_c = 38.4 + 47.52 \times 0.44 = 59.3 \text{ Km.}$$

#### 4.10.3 Calibración del modelo para condiciones críticas (estiaje).

Las condiciones de calidad se hacen críticas cuando disminuye el volumen de escurrimiento, es decir, en la época de estiaje. Los datos para la aplicación del modelo en época de ---

estiaje se muestran en la figura 4.7; en base a estos datos se procede a calcular las variaciones de OD y DBO, en la misma forma que para la época de muestreo.

Primer balance.- Río Duero - Arroyo El Santuario.

$$DBO = \frac{4.2 \times 2.0 + 0.1 \times 50}{4.2 + 0.1} = 3.1 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{4.2 \times 6.9 + 0.1 \times 4.0}{4.2 + 0.1} = 6.8 \text{ mg/l}$$

Segundo balance.- Río Duero - Lago Caméscuar.

$$DBO = \frac{4.3 \times 3.1 + 1.0 \times 2.0}{4.3 + 1.0} = 2.9 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{4.3 \times 6.8 + 1.0 \times 6.3}{4.3 + 1.0} = 6.7 \text{ mg/l}$$

Tercer balance.- Río Duero - Descarga hidroeléctrica.

$$DBO = \frac{3.3 \times 2.9 + 1.85 \times 3.6}{3.3 + 1.85} = 3.2 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{3.3 \times 6.7 + 1.85 \times 7.0}{3.3 + 1.85} = 6.8 \text{ mg/l}$$

Cuarto balance.- Río Duero - Río Celio.

$$DBO = \frac{4.24 \times 3.2 + 0.16 \times 4.0}{4.24 + 0.16} = 3.2 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{4.24 \times 6.8 + 0.16 \times 6.6}{4.24 + 0.16} = 6.8 \text{ mg/l}$$

Quinto balance.- Río Duero (Dren A) - a.r. Zamora

$$DBO = \frac{1.5 \times 3.2 + 0.4 \times 200}{1.5 + 0.4} = 44.6 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{1.5 \times 6.8 + 0.4 \times 0}{1.5 + 0.4} = 5.4 \text{ mg/l}$$

Para el primer tramo se tiene:

$$\begin{aligned} \text{OD inicial} &= 5.4 \text{ mg/l} \\ \text{OD sat} &= 7.6 \text{ mg/l} \\ \text{Do} &= 7.6 - 5.4 = 2.2 \text{ mg/l} \\ \text{DBO}_5 \text{ inicial} &= 44.6 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

Para el segundo tramo se tiene:

Sexto balance.- Rfo Duero - Dren A - Dren Chavinda

$$\text{DBO} = \frac{0.8 \times 3.2 + 2.8 \times 31.3 + 0.1 \times 12}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 24.6$$

$$\text{OD} = \frac{0.8 \times 5.3 + 2.8 \times 1.0 + 0.1 \times 6.2}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 2.4$$

$$\begin{aligned} \text{OD inicial} &= 2.4 \text{ mg/l} \\ \text{OD sat} &= 7.6 \text{ mg/l} \\ \text{Do} &= 5.2 \text{ mg/l} \\ \text{DBO}_5 \text{ inicial} &= 24.6 \text{ mg/l} \end{aligned}$$

En el cuadro 4.5 se muestra el cálculo de los déficit de -- oxígeno para los puntos del A al I, los cuales se grafican en la figura 4.8 y en el cuadro 4.6 se presentan las variaciones de la DBO para estos puntos.

CUADRO 4.1

VALORES DE SATURACION DE OXIGENO EN AGUA DULCE A NIVEL DEL MAR

| TEMPERATURA<br>(°C) | OXIGENO<br>DISUELTO<br>(mg/l) | TEMPERATURA<br>(°C) | OXIGENO<br>DISUELTO<br>(mg/l) |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 0                   | 14.62                         | 16                  | 9.95                          |
| 1                   | 14.23                         | 17                  | 9.74                          |
| 2                   | 13.84                         | 18                  | 9.54                          |
| 3                   | 13.48                         | 19                  | 9.35                          |
| 4                   | 13.13                         | 20                  | 9.17                          |
| 5                   | 12.80                         | 21                  | 8.99                          |
| 6                   | 12.48                         | 22                  | 8.83                          |
| 7                   | 12.17                         | 23                  | 8.68                          |
| 8                   | 11.87                         | 24                  | 8.53                          |
| 9                   | 11.59                         | 25                  | 8.38                          |
| 10                  | 11.33                         | 26                  | 8.22                          |
| 11                  | 11.08                         | 27                  | 8.08                          |
| 12                  | 10.83                         | 28                  | 7.92                          |
| 13                  | 10.60                         | 29                  | 7.77                          |
| 14                  | 10.37                         | 30                  | 7.63                          |
| 15                  | 10.15                         |                     |                               |

CUADRO 4.2

FACTOR DE CORRECCION PARA OXIGENO DE SATURACION A VARIAS ALTITUDES

| ALTITUD<br>(msnm) | PRESION<br>(mmHg) | FACTOR | ALTITUD<br>(msnm) | PRESION<br>(mmHg) | FACTOR |
|-------------------|-------------------|--------|-------------------|-------------------|--------|
| 0                 | 760               | 1.00   | 1,300             | 647               | 0.85   |
| 100               | 750               | 0.99   | 1,400             | 639               | 0.84   |
| 200               | 741               | 0.97   | 1,500             | 631               | 0.83   |
| 300               | 732               | 0.96   | 1,600             | 623               | 0.82   |
| 400               | 723               | 0.95   | 1,700             | 615               | 0.81   |
| 500               | 714               | 0.94   | 1,800             | 608               | 0.80   |
| 600               | 705               | 0.93   | 1,900             | 601               | 0.79   |
| 700               | 696               | 0.92   | 2,000             | 594               | 0.78   |
| 800               | 687               | 0.90   | 2,100             | 587               | 0.77   |
| 900               | 679               | 0.89   | 2,200             | 580               | 0.76   |
| 1000              | 671               | 0.88   | 2,300             | 573               | 0.75   |
| 1100              | 663               | 0.87   | 2,400             | 566               | 0.74   |
| 1200              | 655               | 0.86   | 2,500             | 560               | 0.73   |

CUADRO 4.3

CALIBRACION DEL MODELO DE AUTOPURIFICACION EN EL RIO DUERO

| 1     | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7    | 8      | 9    | 10     | 11        | 12        | 13    | 14    | 15    | 16                | 17  | 18    |
|-------|------|------|------|-----|------|------|--------|------|--------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------------------|-----|-------|
| TRAMO | K    | r    | L    | Do  | Dist | t    | 2x4    | 3-2  | 8/9    | $e^{-kt}$ | $e^{-rt}$ | 11-12 | 10x13 | 5x12  | $\frac{14+15}{D}$ | OD  | PUNTO |
| AB    | 0.80 | 5.76 | 37.3 | 2.3 | 5.1  | 0.11 | 29.84  | 2.96 | 10.081 | 0.916     | 0.661     | 0.255 | 2.571 | 1.520 | 4.1               | 3.5 | B     |
| AC    | 0.80 | 5.76 | 37.3 | 2.3 | 10.6 | 0.22 | 29.84  | 2.96 | 10.081 | 0.839     | 0.437     | 0.402 | 4.053 | 1.005 | 5.1               | 2.5 | C     |
| AD    | 0.80 | 5.76 | 37.3 | 2.3 | 16.6 | 0.35 | 29.84  | 2.96 | 10.081 | 0.756     | 0.268     | 0.488 | 4.920 | 0.616 | 5.5               | 2.1 | D     |
| AE    | 0.80 | 5.76 | 37.3 | 2.3 | 21.3 | 0.45 | 29.84  | 2.96 | 10.081 | 0.698     | 0.184     | 0.514 | 5.182 | 0.423 | 5.6               | 2.0 | E     |
| EF    | 0.63 | 5.19 | 21.9 | 4.6 | 1.6  | 0.03 | 13.797 | 4.56 | 3.026  | 0.981     | 0.856     | 0.125 | 0.378 | 3.938 | 4.3               | 3.3 | F     |
| EG    | 0.63 | 5.19 | 21.9 | 4.6 | 7.8  | 0.16 | 13.797 | 4.56 | 3.026  | 0.904     | 0.436     | 0.468 | 1.416 | 2.006 | 3.4               | 4.2 | G     |
| EH    | 0.63 | 5.19 | 21.9 | 4.6 | 10.3 | 0.22 | 13.797 | 4.56 | 3.026  | 0.871     | 0.319     | 0.552 | 1.670 | 1.467 | 3.1               | 4.5 | H     |
| EI    | 0.63 | 5.19 | 21.9 | 4.6 | 14.8 | 0.31 | 13.797 | 4.56 | 3.026  | 0.823     | 0.200     | 0.623 | 1.885 | 0.920 | 2.8               | 4.8 | I     |

CUADRO 4.4

VARIACION DE LA DBO EN EL RIO DUERO  
CALIBRACION DEL MODELO

| 1     | 2    | 3    | 4    | 5         | 6                       | 7     |
|-------|------|------|------|-----------|-------------------------|-------|
| TRAMO | K    | L    | t    | $e^{-kt}$ | $\frac{3 \times 5}{y'}$ | PUNTO |
| AB    | 0.80 | 37.3 | 0.11 | 0.916     | 34.2                    | B     |
| AC    | 0.80 | 37.3 | 0.22 | 0.839     | 31.3                    | C     |
| AD    | 0.80 | 37.3 | 0.35 | 0.756     | 28.2                    | D     |
| AE    | 0.80 | 37.3 | 0.45 | 0.698     | 26.0                    | E     |
| EF    | 0.63 | 21.9 | 0.03 | 0.981     | 21.5                    | F     |
| EG    | 0.63 | 21.9 | 0.16 | 0.904     | 19.8                    | G     |
| EH    | 0.63 | 21.9 | 0.22 | 0.871     | 19.1                    | H     |
| EI    | 0.63 | 21.9 | 0.31 | 0.823     | 18.0                    | I     |

CUADRO 4.5

RESULTADOS DEL MODELO EN CONDICIONES CRITICAS (ESTIAJE)

| 1     | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7    | 8      | 9    | 10     | 11        | 12        | 13    | 14    | 15    | 16                | 17  | 18    |
|-------|------|------|------|-----|------|------|--------|------|--------|-----------|-----------|-------|-------|-------|-------------------|-----|-------|
| TRAMO | K    | r    | L    | Do  | Dist | t    | 2x4    | 3-2  | 8/9    | $e^{-kt}$ | $e^{-rt}$ | 11-12 | 10x13 | 5x12  | $\frac{14+15}{D}$ | OD  | PUNTO |
| AB    | 0.80 | 3.76 | 44.6 | 2.2 | 5.1  | 0.11 | 35.680 | 2.96 | 12.054 | 0.916     | 0.661     | 0.255 | 3.074 | 1.454 | 4.5               | 3.1 | B     |
| AC    | 0.80 | 3.76 | 44.6 | 2.2 | 10.6 | 0.22 | 35.68  | 2.96 | 12.054 | 0.839     | 0.437     | 0.402 | 4.846 | 0.961 | 5.8               | 1.8 | C     |
| AD    | 0.80 | 3.76 | 44.6 | 2.2 | 16.6 | 0.35 | 35.68  | 2.96 | 12.054 | 0.756     | 0.268     | 0.488 | 5.882 | 0.590 | 6.5               | 1.1 | D     |
| AE    | 0.80 | 3.76 | 44.6 | 2.2 | 21.3 | 0.45 | 35.68  | 2.96 | 12.054 | 0.698     | 0.184     | 0.514 | 6.196 | 0.405 | 6.6               | 1.0 | E     |
| EF    | 0.80 | 5.19 | 24.6 | 5.2 | 1.6  | 0.03 | 15.498 | 4.56 | 3.399  | 0.981     | 0.856     | 0.125 | 0.425 | 4.451 | 4.9               | 2.7 | F     |
| EG    | 0.63 | 5.19 | 24.6 | 5.2 | 7.8  | 0.16 | 15.498 | 4.56 | 3.399  | 0.904     | 0.436     | 0.468 | 1.591 | 2.267 | 3.9               | 3.7 | G     |
| EH    | 0.63 | 5.19 | 24.6 | 5.2 | 10.3 | 0.22 | 15.498 | 4.56 | 3.399  | 0.871     | 0.319     | 0.552 | 1.876 | 1.659 | 3.5               | 4.1 | H     |
| EI    | 0.63 | 5.19 | 24.6 | 5.2 | 14.8 | 0.31 | 15.498 | 4.56 | 3.399  | 0.823     | 0.200     | 0.623 | 2.118 | 1.040 | 3.2               | 4.4 | I     |

CUADRO 4.6

VARIACION DE LA DBO EN EL RIO DUERO  
CONDICIONES CRITICAS (ESTIAJE)

| 1     | 2    | 3    | 4    | 5         | 6                        | 7     |
|-------|------|------|------|-----------|--------------------------|-------|
| TRAMO | K    | L    | t    | $e^{-kt}$ | $\frac{3 \times 5}{y^2}$ | PUNTO |
| AB    | 0.80 | 44.6 | 0.11 | 0.916     | 40.9                     | B     |
| AC    | 0.80 | 44.6 | 0.22 | 0.839     | 37.4                     | C     |
| AD    | 0.80 | 44.6 | 0.35 | 0.756     | 33.7                     | D     |
| AE    | 0.80 | 44.6 | 0.45 | 0.698     | 31.3                     | E     |
| EF    | 0.63 | 24.6 | 0.03 | 0.981     | 24.1                     | F     |
| EG    | 0.63 | 24.6 | 0.16 | 0.904     | 22.2                     | G     |
| EH    | 0.63 | 24.6 | 0.22 | 0.871     | 21.4                     | H     |
| EI    | 0.63 | 24.6 | 0.31 | 0.823     | 20.2                     | I     |

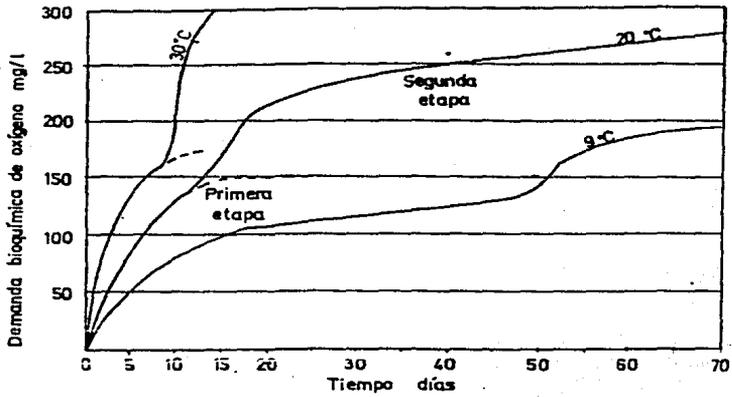


FIG 4.1 PROGRESO DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO) A 9, 20 Y 30 °C

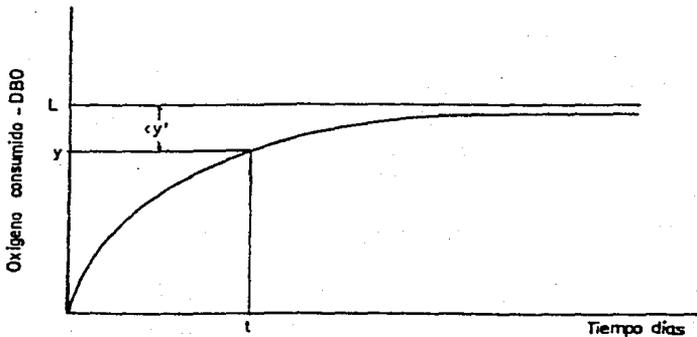


FIG 4.2 PRIMERA ETAPA DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

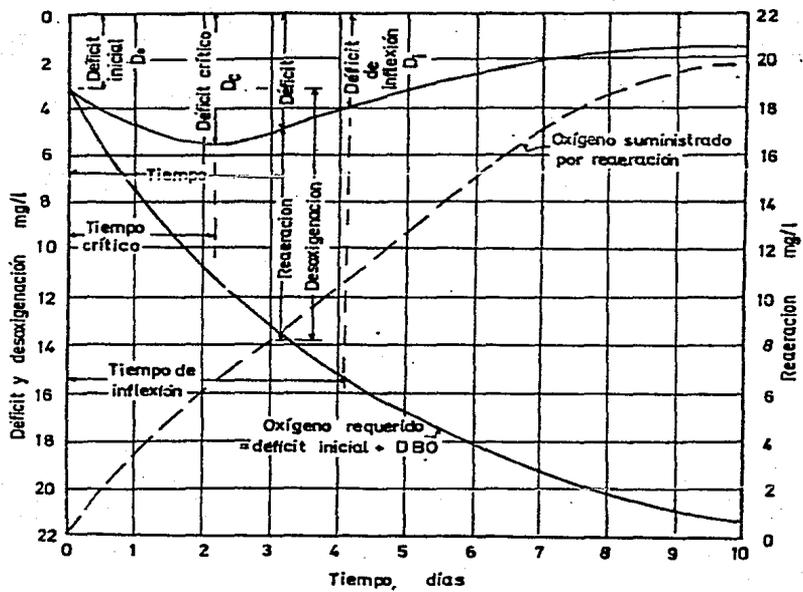


FIG 4.3 BALANCE DE OXIGENO DISUELTO

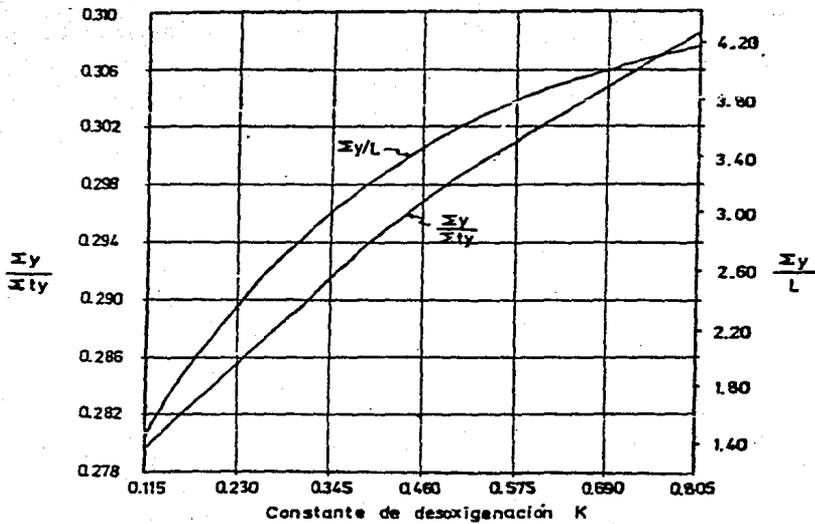
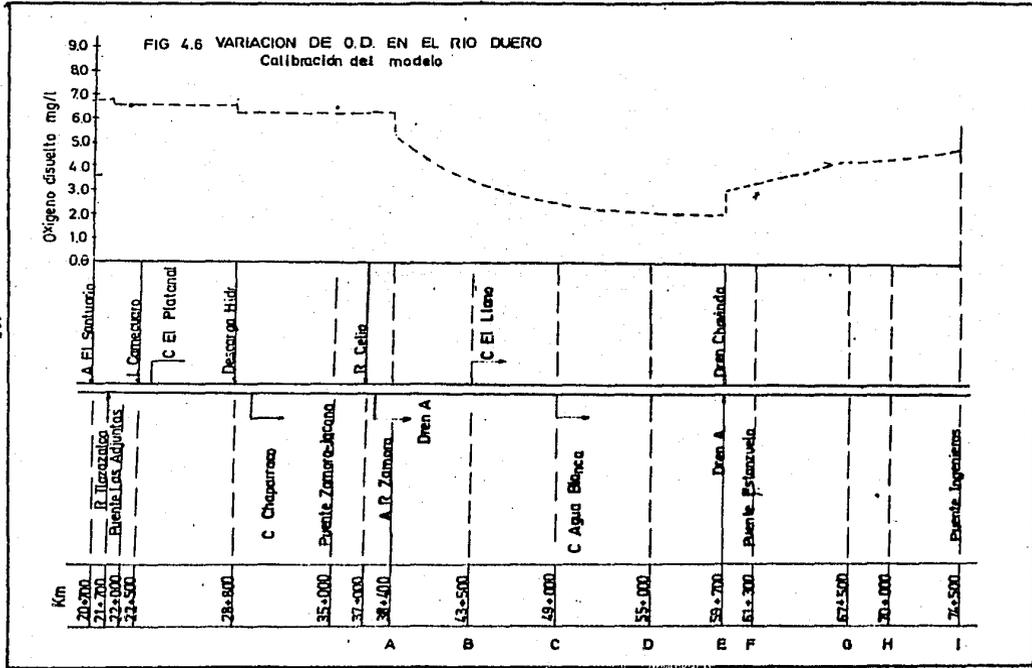
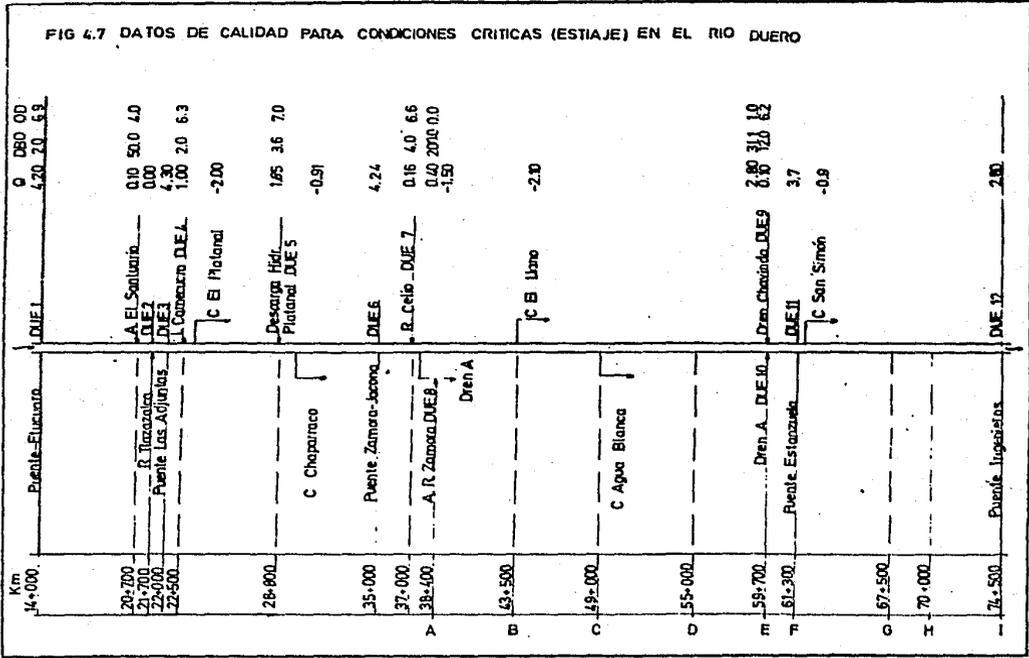


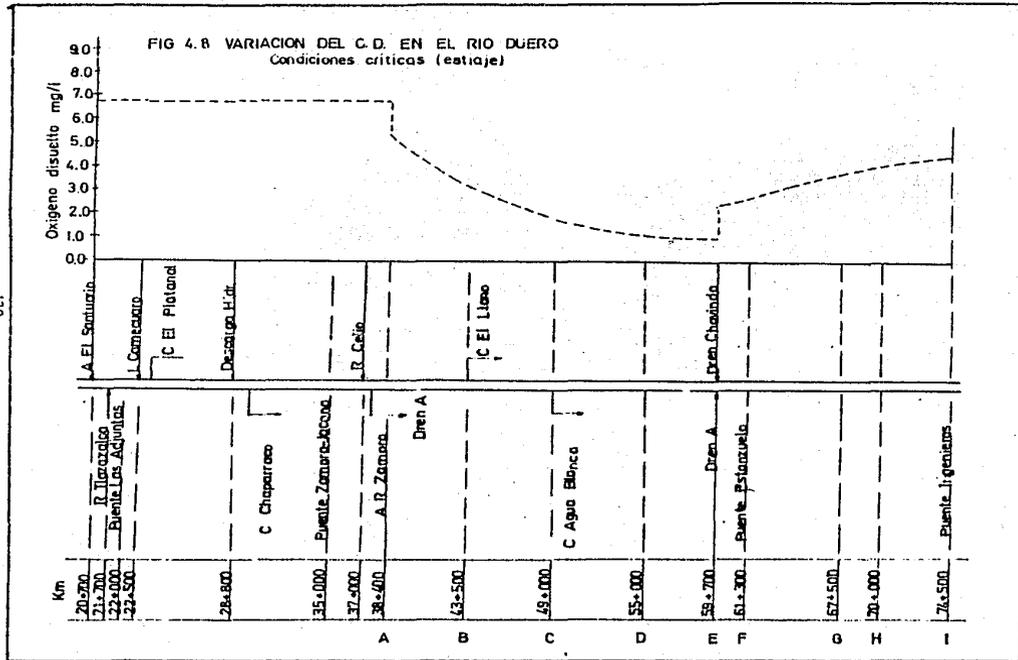
FIG 4.4 VALORES DE K PARA MAGNITUDES CALCULADAS DE  $\frac{\Sigma y}{\Sigma t_y}$  Y VALORES DE  $\frac{\Sigma y}{L}$  PARA ESTOS VALORES DE K, PARA UNA SECUENCIA DE CINCO DIAS

| Km     |                      |                                  | 0     | DBO  | OD  |
|--------|----------------------|----------------------------------|-------|------|-----|
| 14+000 | Puente Elucuro       | DUE 1                            | 5.6   | 20   | 6.9 |
| 20+700 |                      | A El Santuario                   | 0.6   | 35.0 | 5.6 |
| 21+200 | R Tlazozalen         | DUE 2                            | 1.5   | 1.3  | 5.9 |
| 22+000 | Puente Las Adjuntas  | DUE 3                            | 7.7   | 6.6  | 6.5 |
| 22+500 |                      | I Comacum DUE 4                  | 1.8   | 2.0  | 6.3 |
|        |                      | C El Platanal                    | -5.6  |      |     |
| 28+800 |                      | Descarga Hidr.<br>Platanal DUE 5 | 5.2   | 4.5  | 6.0 |
|        | C Chaparraco         |                                  | -3.16 |      |     |
| 35+000 | Puente Zamora-Jacana | DUE 6                            | 5.94  | 5.3  | 6.7 |
| 37+000 |                      | R Celio DUE 7                    | 1.30  | 4.0  | 6.6 |
| 38+400 | A.R. Zamora DUE 8    |                                  | 0.40  | 2000 | 0.0 |
|        | Dren A               |                                  | -2.00 |      |     |
| 43+500 |                      | C El Llano                       | -4.37 |      |     |
| 49+000 | C Agua Blanca        |                                  |       |      |     |
| 55+000 |                      |                                  |       |      |     |
| 59+700 | Dren A DUE 10        | Dren Charipio DUE 9              | 6.45  | 280  | 2.0 |
|        |                      |                                  | 1.20  | 120  | 6.2 |
| 61+300 | Puente Estanzuela    | DUE 11                           | 8.52  | 220  | 3.0 |
|        |                      | C San Simón                      | -1.35 |      |     |
| 67+500 |                      |                                  |       |      |     |
| 70+000 |                      |                                  |       |      |     |
| 74+500 | Puente Ingenieros    | DUE 12                           | 7.17  | 18.0 | 4.8 |

FIG. 4.5 DATOS DE CALIDAD PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DEL RIO QUEIRO







## CAPITULO V

### GRADO DE TRATAMIENTO NECESARIO PARA LAS DESCARGAS

#### 5.1 LEGISLACION.

En México el problema de la contaminación requiere de una atención especial debido a que el país sigue industrializándose y por ende desaloja una mayor cantidad de desechos en sus corrientes, contribuyendo a aumentar el grado de contaminación en que se encuentran estas. Con el objeto de prevenir y controlar la contaminación de las aguas, así como para mejorar, conservar y restaurar al medio ambiente en general, el Gobierno Federal ha decretado los siguientes instrumentos legales:

- Ley Federal de Aguas.
- Ley Federal de Protección al Ambiente.
- Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de aguas.
- Código Sanitario.
- Reglamento de la Ley de Obras Públicas.

##### 5.1.1. Ley Federal de Aguas.

Esta Ley expedida el 30 de diciembre de 1971, establece como objetivo principal realizar una distribución equitativa de los recursos hidráulicos y cuidar de su conservación, reglamentando las disposiciones que en materia de aguas establecen los párrafos 5° y 6° del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que regulan la explotación, el uso y aprovechamiento de las aguas propiedad de la Nación, incluidas aquellas del subsuelo mediante obras artificiales, para que se reglamente su extracción, utilización y veda, conforme lo exija el interés público.

La aplicación de esta Ley, en proyectos que ameriten estudios de impacto ambiental y particularmente en lo que respecta al factor agua, se limita a las concesiones que otorgue la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas o las sustancias y materiales que se encuentren en los vasos y cauces de los cuerpos de aguas. Asimismo, la SARH puede celebrar convenios para la construcción de obras que tengan como fin explotar, usar o aprovechar las aguas cualquiera que sea su régimen legal.

En el Título 2º artículo 27 referente a la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas, se establece la prioridad de los usos que se darán a las aguas propiedad de la Nación, entendiéndose que es de la competencia del Ejecutivo Federal alterar este orden cuando lo exija así el interés público, salvo el caso de uso doméstico que siempre tendrá preferencia. Los usos que establece el artículo 27, son los siguientes, de acuerdo a su prioridad:

- I Usos domésticos.
- II Servicios públicos urbanos.
- III Abrevaderos de ganado.
- IV Riego de terrenos:
  - a) Ejidales o comunales
  - b) De propiedad privada.
- V Industrias:
  - a) Generación de energía eléctrica para servicio público.
  - b) Otras industrias.
- VI Acuacultura
- VII Generación de energía eléctrica para servicio privado.
- VIII Lavado y entarquinamiento de terrenos.
- IX Otros.

Por otro lado, en lo que se refiere a sanciones, el artículo 175 establece: La Secretaría sancionará conforme lo previsto-

por esta Ley, las siguientes faltas:

- I Arrojar sin permiso, a los cauces o vasos de propiedad nacional, aguas de desechos industriales;
- II Desviar o derivar aguas de propiedad nacional, sin autorización;
- III Hacer o permitir que las aguas se derramen de los cauces, vasos y obras;
- IV Destinar las aguas a explotaciones, usos o aprovechamientos distintos a los autorizados;
- V Ocupar sin permiso de la Secretaría, los vasos, cauces, canales, zonas federales y zonas de protección;
- VI Alterar, sin permiso de la Secretaría, las obras autorizadas para la explotación, uso o aprovechamiento del agua -- o su operación;
- VII No acondicionar las obras o instalaciones en los términos establecidos en los reglamentos o en las demás disposiciones que dicte la Secretaría.

#### 5.1.2 Ley Federal de Protección al Ambiente.

Esta Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación - el 11 de enero de 1982 y que entró en vigor el 11 de febrero de ese mismo año, y que deroga a la Ley Federal para Prevenir y -- Controlar la Contaminación Ambiental del 12 de marzo de 1971, - la cual dio origen a los Reglamentos siguientes que seguirán -- aplicándose mientras no se expidan los relativos a la Ley actual:

- Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica Originada por la Emisión de Humos y Polvos (Diario Oficial del 17 de septiembre de 1971).
- Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas (Diario Oficial del 29 de marzo de 1973).
- Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación

Ambiental Originada por la Emisión de Ruidos (Diario Oficial del 2 de enero de 1976).

El objetivo de esta Ley es la protección, mejoramiento, conservación y restauración del ambiente, así como la prevención y control de la contaminación que lo afecte. La adecuada aplicación de esta Ley, en relación con el factor agua, debe basarse en la consulta de todos los artículos del Capítulo Primero de Disposiciones Generales; especialmente el artículo 7° del Capítulo Tercero de la Protección de las Aguas; del Capítulo Cuarto de la Protección del Medio Marino, y de todos aquellos artículos que de una u otra forma tengan relación con la contaminación del agua o puedan ser afectados por ella.

#### 5.1.3. Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas.

Este Reglamento constituye indiscutiblemente el documento, desde el punto de vista técnico, más importante. Su objetivo es, según lo menciona su artículo 1° "prever, en la esfera administrativa, a la observación de la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental en toda la República, en lo que se refiere a la prevención y control de la contaminación de las aguas, cualquiera que sea su régimen legal". Es decir, es el instrumento que especifica las acciones del Gobierno Federal para solucionar el problema del deterioro de la calidad del agua. Las principales acciones del Reglamento son, básicamente:

- 1) Todas las descargas de aguas residuales deben cumplir con ciertos valores máximos tolerables de cinco parámetros de contaminación.
- 2) Cada descarga de aguas residuales debe cumplir con una serie de requisitos de calidad denominadas "condiciones particulares de las descargas", que serán fijadas en función de las características y usos del cuerpo receptor al que vierta.

Para el logro de estas acciones se consideraron en un momento, tres etapas, consistentes en:

Primera etapa.- Durante esta se realizó, ante la desaparecida - Secretaría de Recursos Hidráulicos, el registro de todas las descargas de aguas residuales provenientes de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas o pecuarios, con excepción de las originadas en casas habitación. Dicho registro no implicó una autorización de descarga, sino que tenía como objetivo primordial el efectuar el inventario de las descargas de aguas residuales a fin de obtener la información necesaria para determinar la calidad de los cuerpos receptores y realizar la programación de acciones para prevenir y controlar la contaminación de las aguas. A partir de la fecha de registro se estipuló un plazo de tres años para que las descargas de aguas residuales cumplieran con cinco características de calidad, para las cuales se fijan valores máximos permisibles en el artículo 13 del Reglamento, dichas características se muestran en el cuadro 5.1.

Las descargas que requieran obras e instalaciones de purificación para que su calidad cumpliera con lo indicado deberían -- presentar, en un plazo de diez meses contados a partir de la fecha de terminación del registro, un Informe Preliminar de Ingeniería que incluyera las siguientes fases sucesivas:

- 1.- De trabajos internos.
- 2.- De trabajos externos.
- 3.- De adquisiciones.
- 4.- De construcción.
- 5.- De cumplimiento.

Segunda etapa.- Se refiere al cumplimiento, por parte de los -- responsables de las descargas, de lo indicado por ellos mismos -- en su Informe Preliminar de Ingeniería, a fin de que las descargas de aguas residuales pudieran satisfacer los requisitos de ca

lidad para las cinco características mencionadas.

Tercera etapa.- Durante esta etapa, se determinan y fijan las condiciones particulares de descarga de aguas residuales. Estas condiciones consisten en el conjunto de propiedades físicas, químicas y bacteriológicas a satisfacer por las aguas residuales -- antes de su descarga en un cuerpo receptor. Estas condiciones -- particulares de descarga se fijan en función de los estudios de calidad del agua y de la clasificación, según su uso, de los cuerpos receptores.

Actualmente se han cumplido las dos primeras etapas y se -- está llevando a cabo la fijación de las condiciones particulares de descarga correspondiendo a la tercera.

Un aspecto sumamente importante para fines técnicos, es el que trata el artículo 24 del Reglamento referente a la clasificación de las aguas de los cuerpos receptores. En la Tabla No. 2 del artículo 24 se muestra la clasificación de los cuerpos de -- agua en función de sus usos y características de calidad, con el fin de que la SARH fije condiciones particulares de descarga. En la Tabla No. 3 se establecen los valores máximos permisibles de -- sustancias tóxicas en los cuerpos receptores. En los cuadros -- 5.2 y 5.3 se presentan las Tablas No. 2 y 3 respectivamente del -- artículo 24 del Reglamento.

Por lo visto anteriormente, este reglamento es aplicable -- tanto a la construcción como a la operación de proyectos que amen -- ritten un estudio de impacto ambiental y que pueden ocasionar de -- gradación de la calidad del agua.

#### 5.1.4 Código Sanitario.

El Código Sanitario establece, en su artículo 53, que es -- atribución de la Secretaría de Salubridad y Asistencia la preven --

ción y control de la contaminación del agua para consumo humano, uso doméstico y aprovechamiento agrícola o industrial, cuando -- dañe o pueda dañar la salud de los seres humanos.

A continuación se transcriben los artículos 57 y 58 que son los más importantes, en relación a la contaminación del agua:

Artículo 57.- Los usuarios que aprovechen en su servicio - aguas que requieran ser usadas posteriormente por los habitantes de alguna población, están obligados a devolverlas sin altera -- ción nociva a la salud de dichos habitantes, de acuerdo con los reglamentos correspondientes.

Artículo 58.- En los ríos, lagos, lagunas o cualquier otra fuente, cuyas aguas se utilicen para uso doméstico, para balnearios o para criadero de fauna acuática, queda prohibido descargar aguas residuales que contengan contaminantes, en cantidades superiores a los máximos permisibles señalados en los reglamentos respectivos.

#### 5.1.5 Reglamento de la Ley de Obras Públicas.

Este Reglamento en su artículo 17, hace referencia a que la Secretaría de Salubridad y Asistencia, con la participación que corresponde a la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, en lo referente a aguas, establecerá las normas, criterios y lineamientos, para que en la planeación de la obra pública las dependencias y entidades prevean los efectos y consecuencias sobre las condiciones ambientales, en las fases de construcción y operación y que los proyectos incluyan lo necesario para preservar, restaurar y mejorar dichas condiciones y los procesos ecológicos.

Como se ve, este artículo da pie a que se establezcan las - normas ambientales necesarias, incluso aquellas que no estén res

paldadas por un marco legal, con el objeto de proteger la calidad del agua y los ecosistemas que de ellas dependen, cuando se desarrolla y realiza un proyecto.

## 5.2 MEDIDAS DE ATENUACION.

Además del análisis de los impactos ambientales, se debe -- realizar el diseño de las medidas de atenuación con el fin de mi -- nimizar o evitar los impactos desfavorables que el desarrollo de ciertas obras y/o actividades generen. Tales medidas pueden estar constituidas por:

A) Acciones de carácter legal.- Por lo que respecta al agua, la legislación existente señalada anteriormente, representa el punto de partida y a la vez, el más sólido soporte de las acciones tendientes a proteger el ambiente. En el Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas, se encuentra descrita la estrategia trazada por el Gobierno Federal en este sentido.

De esta forma, de acuerdo con tal estrategia, las nuevas -- descargas de agua residuales, equivalentes a fuentes de deterioro del ambiente en la zona del proyecto y su área de influencia, deben quedar plenamente indentificadas, tanto en volumen como en calidad; así como definidos los procedimientos de atenuación, de sujeción a los máximos permisibles de los parámetros señalados en el Reglamento y la asignación de condiciones particulares de descarga de acuerdo a las características y uso de los cuerpos -- receptores.

B) Acciones de carácter técnico.- Si como resultado de un estudio preliminar se estima que los estándares de calidad del --- agua serán excedidos por las acciones propuestas, será necesario establecer medidas o estrategias de control y abatimiento que ga -- ranticen la atenuación de los impactos desfavorables.

Entre estas medidas se pueden considerar: sistemas de tratamiento de residuos; modificaciones en los procedimientos constructivos y procesos productivos causantes de los impactos adversos, y aún, cambios de actitud o de comportamiento poco favorables al ambiente, como el no disponer adecuadamente los residuos generados en las etapas de construcción y operación de un determinado proyecto, el no dar apoyo a programas de saneamiento, el no respetar las normas establecidas de calidad del agua, etc.

No obstante que la tecnología actualmente disponible para el tratamiento de las aguas residuales puede lograr la obtención de agua prácticamente pura, los costos involucrados así como la tolerancia admitida por ciertos usos, orienta las medidas de control hacia un equilibrio entre estos aspectos, tomando siempre en consideración lo establecido en los ordenamientos legales.

### 5.3 PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO

Los contaminantes presentes en las aguas residuales pueden ser eliminados de estas por medio de procesos físicos, químicos y biológicos. En la práctica los tres se encuentran comúnmente combinados en trenes de procesos unitarios de tratamiento que integran, de acuerdo a su disposición, los diversos procesos de tratamiento en sí.

1.- Procesos unitarios físicos.- Los procesos unitarios en los que la forma de eliminación de los contaminantes se logra mediante la aplicación de fuerzas físicas son conocidos como procesos físicos. Dentro de estos se encuentran comprendidos el tamizado, mezclado, sedimentación y filtración.

2.- Procesos unitarios químicos.- Se conoce así a los procesos de tratamiento en los que, tanto la eliminación como la conversión de contaminantes se logra mediante reacciones químicas tales como la precipitación, transferencia de gases, adsorción y desin

fección.

3.- Procesos unitarios biológicos.- De esta forma se denominan a los procesos en los cuales la eliminación de contaminantes se logra mediante la actividad biológica. Estos procesos son empleados para eliminar la materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta. Esta materia se convierte principalmente en gases que se liberan en la atmósfera y en tejido celular que se deposita y se elimina mediante sedimentación. Otro objetivo del tratamiento biológico de las aguas residuales es la eliminación de elementos conocidos como "nutrientes", constituidos principalmente por compuestos de nitrógeno y fósforo.

#### 5.4 NIVELES DE TRATAMIENTO

Dependiendo de los fines que se persigan en cuanto a la calidad de agua que se obtenga del efluente de un planeta de tratamiento será el nivel de tratamiento que será necesario aplicar para lograr dicha calidad. En general se contemplan los siguientes niveles de tratamiento:

1) Pretratamiento.- Conocido también como tratamiento preliminar, tiene como funciones principales la remoción de sólidos sedimentables y de material flotante. En el pretratamiento se distinguen dos etapas: la primera que sirve para la remoción de sólidos gruesos, para lo cual se emplean rejillas, mallas y ocasionalmente desmenuzadores, los cuales trituran los sólidos gruesos sin eliminarlos de la corriente de agua. La segunda etapa consiste en una cámara de desarenación donde se separa la arena del material orgánico para que sea desechada sin causar problemas en los procesos posteriores.

2.- Tratamiento primario.- Consiste, fundamentalmente, en un proceso de sedimentación simple, es decir, sin la ayuda de coagulantes que favorezcan la formación de flóculos. Su objetivo ---

principal es reducir la cantidad de sólidos suspendidos sedimentables.

3.- Tratamiento secundario.- Conocido también como tratamiento biológico, aunque realmente consiste en procesos bioquímicos en los cuales ciertos microorganismos emplean la materia orgánica y los nutrientes biológicos contenidos en las aguas residuales --- para su reproducción. Los procesos de tratamiento secundario se pueden agrupar en tres grandes categorías:

a) Digestión aerobia.- Toma en consideración la presencia de oxígeno disuelto para que la estabilización de la materia orgánica se lleve a efecto en condiciones aeróbicas.

b) Digestión anaerobia.- En esta, el material orgánico se estabiliza en un medio carente totalmente de oxígeno disuelto, presentando la ventaja de ofrecer como subproductos, elementos con un alto valor energético.

c) Lagunas de estabilización.- En estas la estabilización de la materia orgánica se logra mediante un proceso simbiótico entre algas y bacterias.

Otro aspecto considerado en el tratamiento secundario es la sedimentación posterior al tratamiento biológico, conocido como sedimentación secundaria.

4.- Tratamiento terciario.- Conocido también como tratamiento avanzado, persigue el propósito de remover aquellos contaminantes que permanecen en el agua después de recibir un tratamiento secundario, tales como los nutrientes, compuestos que causan color, olor, y turbiedad, compuestos orgánicos que provocan demanda de oxígeno, sales inorgánicas, metales pesados, organismos patógenos, etc. Dentro de estos se comprenden la coagulación, procesos de nitrificación, cloración a punto de quiebre, desorción-

de amoniaco, intercambio iónico, filtración, microtamizado, carbón activado, ozonación, ósmosis inversa, electrodiálisis, etc.

5.- Procesos complementarios.- Se entiende por procesos complementarios a todos aquellos métodos que se utilizan en el tratamiento de la materia sedimentada, misma que se conoce como "lodos".

## 5.5 PROCESOS DE TRATAMIENTO

Se define como proceso de tratamiento a todo un tren de procesos unitarios de tratamiento que integran, en conjunto, el proceso mediante el cual se logrará el tratamiento de las aguas residuales.

En el cuadro 5.4 se presentan los procesos unitarios y procesos de tratamiento empleados en la remoción de los principales contaminantes de las aguas residuales. En el cuadro 5.5 se presenta un sumario de las características del efluente de varias alternativas de tratamiento.

En la figura 5.1 se presentan algunas opciones en los procesos de tratamiento de las aguas residuales; en este sentido existe una gran diversidad de procesos de tratamiento biológico, a nivel secundario, empleados frecuentemente en el tratamiento de estas aguas. De entre ellos, los más comunes son los siguientes:

### 5.5.1 Lodos activados.

En este proceso una suspensión de organismos integrada por hongos, metazoarios, rotíferos y algunos nemátodos, es formada por la aereación del volumen de agua que contiene los compuestos orgánicos biodegradables; las bacterias al buscar su alimento forman flóculos orgánicos que al aumentar de diámetro y peso, se sedimentan fácilmente en los tanques de sedimentación secunda---

rios. Del fondo de estos tanques se regresa al reactor una parte de los sedimentos que se denominan lodos, con objeto de activar la formación de los flóculos en los nuevos volúmenes por tratar, debiéndose a esto el nombre de lodos activados.

El proceso original ha sufrido varias modificaciones para resolver problemas específicos de operación. Algunas de estas son las conocidas como contacto-estabilización, alto índice de aeración extendida, aeración modificada, aeración por pasos, mezcla total y purificación alta de oxígeno. En la práctica estas modificaciones están representadas por variaciones en el tiempo de retención, en la configuración del tanque de aeración, en la recirculación de los lodos y en la técnica empleada para introducir el aire al proceso.

El proceso convencional de lodos activados está constituido fundamentalmente por tres unidades: un tanque de aeración, un tanque de sedimentación secundaria y una línea para la recirculación de lodos. En este sistema tanto el influente como los lodos recirculados ingresan simultáneamente al tanque de aeración, donde son aerados y mezclados por un lapso de aproximadamente seis horas. En este tiempo se producen los fenómenos de adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. Una vez efectuada la decantación en el sedimentador secundario, se lleva el agua a una desinfección (generalmente cloración); los lodos sedimentados pasan a su vez a un tratamiento en donde se efectúa la descomposición de la materia orgánica que llevan.

En la figura 5.2 se presenta el esquema del proceso de lodos activados convencional.

#### 5.5.2 Discos biológicos.

En este sistema se emplean discos de material sintético, normalmente poliestireno o polietileno, de diámetro grande, mon-

tados en un eje horizontal e instalados en tanques de concreto. Este ensamble de discos se hace girar lentamente por medios mecánicos, manteniendo aproximadamente el 40% de su superficie sumergida en el agua. Los organismos presentes en esta, se adhieren a la superficie giratoria y se multiplican, formándose así una capa, conocida como biomasa, de entre 1 y 4 mm. de espesor; la población microbiana que con esto se alcanza es sumamente numerosa, lo cual redundo en alcanzar altos niveles de tratamiento en lapsos relativamente reducidos.

Por otra parte, los discos al girar, acarrean consigo una capa de agua residual que al entrar en contacto con el aire absorbe oxígeno. Los organismos de la biomasa toman de esta capa el oxígeno requerido para su respiración obteniendo la materia orgánica necesaria para efectuar sus funciones metabólicas del agua residual en tratamiento. El exceso de biomasa que se presenta en los discos, debido a la reproducción de los microorganismos, es eliminado por las fuerzas cortantes ejercidas por el agua al girar los discos en el seno de ésta; estos sólidos se mantienen en suspensión gracias a la turbulencia generada por la rotación hasta que son conducidas a un sedimentador secundario para su eliminación.

En la figura 5.3 se presenta el esquema convencional de una planta con discos biológicos así como un módulo de discos de este tipo.

### 5.5.3 Zanjas de oxidación.

Este proceso ha demostrado ser una alternativa flexible y económica cuyas características proveen elevados niveles de remoción de DBO, de sólidos suspendidos y de fósforo facilitando además la nitrificación del nitrógeno tanto amoniacal como orgánico. Resulta ser particularmente apropiado en los casos en que existan variaciones importantes en el régimen de flujo del agua por

tratar, en donde la temperatura ambiente sea baja y cuando no -- existe la facilidad de encontrar personal técnico capacitado para llevar a cabo la operación de la planta. Por estos motivos el - empleo de este proceso en la industria se ha vuelto bastante común, sobre todo en aquellas cuyo ramo está relacionado con productos lácteos, fabricación de papel, procesamiento de alimentos, productos farmacéuticos y en empacadoras de carne y embutidos.

El motivo principal de la aceptación de este proceso en -- plantas de Norteamérica y Europa es el representado por la economía tanto de la construcción como de la operación con respecto a alternativas de procesos biológicos más convencionales, puesto - que no es necesario incluir los conceptos correspondientes al -- tratamiento primario, digestión de lodos, equipo de nitrifica-- ción ni tanques de regulación.

Un aspecto importante del proceso es su operación, la cual - se puede llevar a cabo de dos formas: continúa en la cual la --- aeración se puede efectuar con rotores horizontales o bien con - aeradores verticales de tipo turbina (carousel) e intermitente (BATH) en la cual las aguas residuales tratadas se descargan des - pués de un determinado tiempo de retención, procediéndose enton - ces a extraer los lodos almacenados en el fondo de la zanja me - diante una trampa de lodos y una bomba para ser enviados directa - mente a su desecación.

Por lo que se refiere a la geometría de las zanjas, se han - adoptado varias configuraciones, aunque las más frecuentes corres - ponden a un canal de sección uniforme en forma de circuito circu - lar o elíptico. En la figura 5.4 se presentan algunas configura - ciones que se pueden emplear dependiendo del sitio disponible pa - ra la ubicación de la planta.

#### 5.5.4 Filtros rociadores.

Este proceso es muy semejante al de lodos activados; consta

de las mismas unidades diferenciándose sólo en la forma de aerar el agua, pues en este procedimiento se logra mediante el rociado del agua sedimentada sobre un lecho filtrante constituido de pedacera de piedra. Durante el paso del agua por la atmósfera y parte del escurrimiento sobre el material de filtro, las bacterias consiguen su oxígeno, imperando de esta manera las aerobias; la capa gelatinosa que se desarrolla sobre la superficie de la pedacera de piedra que forma el filtro, es un verdadero cultivo de bacterias en simbiosis con hongos y otras especies superiores, los cuales digieren la materia orgánica que lleva el agua ya rica en oxígeno desde su desprendimiento a través de los aspersores. El agua se recolecta del fondo del tanque filtrador para conducirse al sedimentador secundario y finalmente a desinfección.

También de este proceso, existen variantes que dependen del modo de recircular los lodos y más marcadamente de la forma del filtro rociador. En la figura 5.5 se presenta un corte esquemático de un filtro rociador.

#### 5.5.5 Lagunas de estabilización.

Es el nombre con el que se conoce a las estructuras de tierra que proveen de tratamiento biológico a las aguas residuales. Los tipos y modificaciones de las lagunas de estabilización son varias y se pueden clasificar como lagunas aerobias, lagunas anaerobias, lagunas facultativas, lagunas aerobias aeradas y lagunas facultativas aeradas.

Este proceso puede ser diseñado de múltiples maneras; en forma de lagunas en serie o en paralelo, pueden ser complementadas por tanques de sedimentación secundaria con recirculación de lodos e inclusive pueden ser operadas en forma por entero similar a alguna de las múltiples variantes del proceso de lodos activados, asimismo, se pueden emplear con fines de pulimento de afluen

tes para tratamiento avanzado. De la misma manera el diseño se puede efectuar sobre las bases de que se tenga una evaporación completa del influente, como un medio de alivio en casos de gastos extremos, para recarga de acuíferos mediante infiltración y como un medio para abastecer de agua y nutrientes a cosechas mediante la irrigación.

a) Lagunas aerobias.- Son lagunas poco profundas en las cuales la materia orgánica es degradada por bacterias aerobias y fa cultativas. Normalmente la carga de contaminantes que soportan es ligera, razón por la cual se emplean frecuentemente con fines de pulimento de efluentes de otros procesos o bien cuando la car ga de contaminantes a tratar no es importante. La característica más importante es que la materia orgánica biodegradable, en suspensión o disuelta, requiere del oxígeno disuelto producido por las algas mediante la fotosíntesis para estabilizarse. Las lagunas aerobias son de dos tipos; en el primero de ellos el objetivo es maximizar la producción de algas, razón por la cual -- son mucho más someras que las segundas, en las cuales el objetivo es maximizar la cantidad producida de oxígeno, motivo por el cual son más profundas.

La microbiología de este proceso es bastante sencilla: el oxígeno requerido por las bacterias para el proceso orgánico de degradación de la materia es aportado tanto por las algas como por la aeración superficial del tanque, a su vez los nutrientes y el carbono desechados por las bacterias son aprovechados por las algas.

b) Lagunas aerobias.- Son utilizadas como proceso de pretratamiento para reducir la carga de DBO en lagunas facultativas posteriores y sirven para evitar el ascenso a la superficie de cantidades importantes de lodos, en ellas la reducción de DBO es -- función del tiempo de retención y de la temperatura del agua; -- como consecuencia de esto, se tiene que el tiempo que toma el --

proceso suele ser largo.

El proceso anaerobio de degradación de la materia orgánica está formado por dos etapas; la primera de ellas se lleva a cabo gracias a la acción de bacterias que originan la producción de ácidos, en la segunda es gracias a la acción de bacterias productoras de metano. En la primera de estas etapas la remoción de la DBO es pequeña, siendo hasta la segunda cuando la degradación de la materia orgánica es efectiva y además, proporcional a la producción de gas metano.

Los factores más importantes que es necesario tener en cuenta en este tipo de lagunas son la temperatura, el pH, el tiempo de retención y la carga orgánica, esto con el efecto de que la producción de bacterias formadoras de ácidos y de metano sea favorable e incremente así la efectividad de la laguna.

c) Lagunas facultativas.- En estas la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales se efectúa gracias a la acción conjunta de bacterias aerobias, anaerobias y de un tercer tipo conocidas como bacterias facultativas.

Las lagunas de este tipo están integradas por tres zonas: - la primera de ellas es la que está cercana a la superficie en la que existen tanto algas como bacterias aeróbicas, llevando entre sí una relación simbiótica; la segunda es la zona intermedia que puede ser considerada parte aeróbica y parte anaeróbica y en la cual la descomposición de la materia se efectúa gracias a la acción de las bacterias facultativas; la tercera zona es la más profunda de la laguna y en ella la descomposición de los sólidos sedimentados es llevada a cabo mediante un proceso netamente anaeróbico.

d) Lagunas aerobias aeradas.- Este es un tipo de lagunas en el que se prescinde de la acción de las algas para la producción

de oxígeno en el agua, empleándose para este fin medios mecánicos para promover la transferencia de oxígeno y provocar una cierta agitación en el agua. Estas lagunas tuvieron su origen cuando en las lagunas de estabilización se instalaron sistemas de aeración para evitar la producción de malos olores y para incrementar la capacidad de tratamiento en lagunas sobrecargadas, constituyen asimismo, una variación del proceso de lodos activados que se ha desarrollado con el objeto de reducir los costos que implica la construcción de tanques de concreto e incrementar los períodos de tratamiento para aquellos residuos difíciles de biodegradar.

e) Lagunas facultativas aeradas.- Son completamente similares a las anteriores, con la única salvedad de que la potencia suministrada por los aeradores no es lo suficientemente grande como para poder mantener en suspensión a todos los sólidos y sí la suficiente para distribuir oxígeno en toda el agua de la laguna. Al producirse la sedimentación en el fondo de la laguna se origina un proceso anaeróbico en la capa más profunda, por lo cual son diseñadas tomando en cuenta la acumulación de estos sólidos.

## 5.6 CLASIFICACION DE LA CORRIENTE

Cuando una descarga de agua residual es vertida en el cuerpo de agua, lo ideal sería que dicha descarga tuviera las condiciones naturales del cuerpo que la recibe. Sin embargo, como esto en la mayoría de los casos no puede ser económicamente factible, el tratamiento mínimo necesario es aquel cuya calidad permita conservar el recurso para los usos posteriores a que esté destinada. Para tal fin, se hace necesario clasificar las aguas como lo estipula el artículo 23 del Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación en función de sus usos y capacidad de asimilación y dilación.

De acuerdo con la calidad existente y los usos actuales y -

futuros, el río Duero se puede clasificar como DI en sus primeros 20 kilómetros, lo cual implica sólo el control de pequeñas poblaciones en su vertido y servirá como fuente alternativa de abastecimiento a futuro para las poblaciones de Chilchota, Tangancicuaro, Zamora y Jacona. A partir del kilómetro 20 en adelante, se puede clasificar como DII para conservar y aumentar el uso piscícola que se le da en la granja existente e implica sólo un tratamiento de las aguas residuales de Zamora de por lo menos 60% para cumplir con todos los límites que establece el Reglamento en sus tablas números 2 y 3.

Una segunda alternativa consiste en clasificar los primeros 20 kilómetros como clase DII con lo cual los controles disminuyen y el resto como DIII que es el uso primordial que se da a las aguas dentro del Distrito de Riego 61. Con esto, sólo se trataría el agua residual de Zamora en un 60% para conservar la concentración de oxígeno disuelto en toda época del año.

Una justificación y las acciones implicadas para cada alternativa, se presentan en el cuadro 5.6.

#### 5.7 GRADO DE TRATAMIENTO NECESARIO

El grado de tratamiento necesario está en función de la calidad que se desee conservar, pero depende también de los tipos de tratamiento que se pueda aplicar conforme a la zona, terreno disponible, manejo de lodos y tecnología regional. Por tal motivo, se observará el resultado del modelo para tres porcentajes de remoción con sistemas secundarios que logren elevar el oxígeno disuelto a valores mayores de 4.0 mg/l.

En el río Duero la principal fuente de contaminación resulta ser actualmente la descarga de la ciudad de Zamora, la cual por su ubicación, características y terreno que atraviesa antes de su descarga, no es conveniente darle un tratamiento primario-

por lo que se calculan los resultados para un 60, 80 y 90% de --  
remoción.

Para las condiciones críticas de gastos y constantes, las --  
nuevas cargas aplicadas al modelo son:

- 1) para 60% de remoción: DBO efluente = 80 mg/l; OD = 1.0  
mg/l.
- 2) para 80% de remoción: DBO efluente = 40 mg/l; OD = 2.0  
mg/l.
- 3) para 90% de remoción: DBO efluente = 20 mg/l; OD = 2.0  
mg/l.

La aplicación del modelo a partir del punto A, será con las  
condiciones iniciales siguientes:

- 1) para 60% de remoción:

$$DBO = \frac{1.5 \times 3.2 + 0.4 \times 80}{1.5 + 0.4} = 19.4$$

$$OD = \frac{1.5 \times 6.8 + 0.4 \times 1.0}{1.5 + 0.4} = 5.6$$

$$Do = 7.6 - 5.6 = 2.0$$

- 2) para 80% de remoción:

$$DBO = \frac{1.5 \times 3.2 + 0.4 \times 40}{1.5 + 0.4} = 10.9$$

$$OD = \frac{1.5 \times 6.8 + 0.4 \times 2.0}{1.5 + 0.4} = 5.8$$

$$Do = 7.6 - 5.8 = 1.8$$

- 3) para 90% de remoción:

$$DBO = \frac{1.5 \times 3.2 + 0.4 \times 2.0}{1.5 + 0.4} = 6.7$$

$$OD = \frac{1.5 \times 6.8 + 0.4 \times 2.0}{1.5 + 0.4} = 5.8$$

$$Do = 7.6 - 5.8 = 1.8$$

La aplicación del modelo a partir del punto E, será con las condiciones iniciales siguientes:

1) para 60% de remoción:

$$DBO = \frac{0.8 \times 3.2 + 2.8 \times 13.5 + 0.1 \times 12}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 11.2 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{0.8 \times 6.8 + 2.8 \times 4.5 + 0.1 \times 6.2}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 5.0 \text{ mg/l}$$

$$Do = 7.6 - 5.0 = 2.6 \text{ mg/l}$$

2) para 80% de remoción:

$$DBO = \frac{0.8 \times 3.2 + 2.8 \times 7.6 + 0.1 \times 12}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 6.8 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{0.8 \times 6.8 + 2.8 \times 5.8 + 0.1 \times 6.2}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 6.0 \text{ mg/l}$$

$$Do = 7.6 - 6.0 = 1.6 \text{ mg/l}$$

3) para 90% de remoción:

$$DBO = \frac{0.8 \times 3.2 + 2.8 \times 4.7 + 0.1 \times 12}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 4.6 \text{ mg/l}$$

$$OD = \frac{0.8 \times 6.8 + 2.8 \times 6.3 + 0.1 \times 6.2}{0.8 + 2.8 + 0.1} = 6.4 \text{ mg/l}$$

$$Do = 7.6 - 6.4 = 1.2 \text{ mg/l}$$

Los resultados del modelo se calculan en el cuadro 5.7 y se grafican en la figura 5.6 para observar la diferencia. En esta-

se ve que con un 60% de remoción la concentración de OD se mantiene por arriba de 4.0 mg/l, lo cual satisface la norma mínima de las clasificaciones DI, DII, y DIII en relación a este parámetro.

En el cuadro 5.8 se calcula la variación de la DBO en el río Duero para el 60, 80 y 90% de remoción.

**CUADRO 5.1**  
**VALORES MAXIMOS PERMISIBLES PARA LAS DESCARGAS**  
**DE AGUAS RESIDUALES**  
**(TABLA Nº 1 DEL ARTICULO 13)**

|  |   |
|--|---|
| 1.- Sólidos sedimentables,<br>valor máximo | 1.0 mg/l  |
| 2.- Grasas y aceites,<br>valor máximo      | 70.0 mg/l   |
| 3.- Materia flotante                       | ninguna que pueda ser rete<br>nida por malla de 3mm de<br>claro libre cuadrado. |
| 4.- Temperatura<br>valor máximo            | 35°C  |
| 5.- Potencial hidrogeno (pH)               | 4.5 a 10.0  |



ANEXO DEL CUADRO 5.2

- (a) Máximo 30°C excepto cuando sea causada por condiciones naturales. Medida en la superficie fuera de la zona de mezclado, la cual se determinará de acuerdo con las características de la descarga.
- (b) Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 mínimas), podrá ser mayor a 2,000 coliformes fecales.
- (c) No deben existir en cantidades tales que provoquen hiperfertilización.
- (d) El criterio con respecto a sustancias tóxicas es el siguiente: ninguna sustancia tóxica sola o en combinación con otras estará presente en concentraciones tales que conviertan el agua del cuerpo receptor en inadecuada para el uso específico a que se destinen.  
El cuadro 5.3 resume algunas de las sustancias tóxicas que de acuerdo con la información disponible se encuentran bajo reglamentación y estudio en varias partes del mundo. Los valores de las sustancias de este cuadro no son limitativas y están sujetos a modificación de acuerdo con el futuro avance tecnológico.
- (e) Este límite, en no más del 10% del total de las muestras mensuales (5 como mínimo) podrá ser mayor a 2,000 coliformes fecales.
- (f) No será permitido color artificial que no sea coagulable por tratamiento convencional.
- (g) Removible por tratamiento convencional.

- (h) 2,000 coliformes fecales como promedio mensual, ningún valor mayor de 4,000.
- (i) Conductividad no mayor de 2,000  $\mu\text{mhos/cm}$ . Si el valor de RAS es mayor a 6, la Secretaría de Recursos Hidráulicos fijará el valor definitivo. RAS = relación de absorción de sodio.  
Boro 0.4 mg/l, para valores superiores, la autoridad competente fijará el valor definitivo.
- (j) Para riego de legumbres que se consuman sin hervir o frutas que tengan contacto con el suelo.

CUADRO 5.3  
 VALORES MAXIMOS PERMISIBLES DE SUBSTANCIAS TOXICAS  
 EN LOS CUERPOS RECEPTORES  
 (TABLA Nº 3 DEL ARTICULO 24)

| CLASIFICACION                                   | DA                   | D1    | D11   | D111  |
|---|----------------------|-------|-------|-------|
| Arsénico  | 0.05                 | 0.05  | 1.00  | 5.00  |
| Bario   | 1.00                 | 1.00  | 5.00  | -     |
| Boro  | 1.00                 | 1.00  | -     | 2.00  |
| Cadmio  | 0.01                 | 0.01  | 0.01  | 0.005 |
| Cobre   | 1.00                 | 1.00  | 0.10  | 1.00  |
| Cromo Hexavalente                               | 0.05                 | 0.05  | 0.10  | 5.00  |
| Mercurio  | 0.005                | 0.005 | 0.01  | -     |
| Plomo   | 0.05                 | 0.05  | 0.10  | 5.00  |
| Selenio   | 0.01                 | 0.01  | 0.05  | 0.05  |
| Cianuro   | 0.20                 | 0.20  | 0.02  | -     |
| Fenoles   | 0.001                | 0.001 | 1.00  | -     |
| Subs. activas al azul de metileno (detergentes) | 0.50                 | 0.50  | 3.00  | -     |
| Extractables con cloroformo                     | 0.15                 | 0.15  | -     | -     |
| Plagicidas                                      |                      |       |       |       |
| Aldrin  | 0.017                | 0.017 |       |       |
| Clordano  | 0.003                | 0.003 |       |       |
| D.D.T.  | 0.042                | 0.042 |       |       |
| Dieldrin  | 0.017                | 0.017 |       |       |
| Endrin  | 0.001                | 0.001 |       |       |
| Hepocloro                                       | 0.018                | 0.018 |       |       |
| Epoxico de Heptacloro                           | 0.018                | 0.018 |       |       |
| Lindono   | 0.056                | 0.056 |       |       |
| Metoxicloro                                     | 0.035                | 0.035 |       |       |
| Fosfatos orgánicos con carboneros               | 0.100                | 0.100 |       |       |
| Toxafeno  | 0.005                | 0.005 |       |       |
| Herbicidas totales                              | 0.100                | 0.100 |       |       |
| Radioactividad                                  | picocuries por litro |       |       |       |
| Beta  | 1.000                | 1.000 | 1.000 |       |
| Radio 226                                       | 3                    | 3     | 3     |       |
| Estroncio                                       | 10                   | 10    | 10    |       |

CUADRO 5.4  
**PROCESOS UNITARIOS Y PROCESOS DE TRATAMIENTO EMPLEADOS EN LA  
 REMOCION DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL**

| CONTAMINANTE                   | PROCESO UNITARIO, PROCESO DE TRATAMIENTO   |
|--------------------------------|--|
| Sólidos suspendidos            | Sedimentación<br>Tamizado<br>Filtración<br>Flotación<br>Adición de polimeros químicos<br>Coagulación/sedimentación<br>Tratamiento en suelos            |
| Materia orgánica biodegradable | Lodos activados<br>Filtros rociadores<br>Discos biológicos<br>Lagunas<br>Filtración intermitente<br>Tratamiento en suelos                              |
| Organismos patógenos           | Cloración<br>Ozonación<br>Tratamiento en suelos  |
| Nitrógeno                      | Variaciones de lodos activados<br>Variaciones de filtros rociadores<br>Variaciones de discos biológicos<br>Intercambio iónico<br>Tratamiento en suelos |
| Fósforo                        | Adición de sales de metales.<br>Coagulación con cal/sedimentación<br>Remoción bioquímica<br>Tratamiento en suelos                                      |
| Metales pesados                | Precipitación química<br>Intercambio iónico<br>Tratamiento en suelos   |
| Sólidos disueltos inorgánicos  | Intercambio iónico<br>Ósmosis inversa<br>Electrodialisis   |

CUADRO 5.5  
 SUMARIO DE LAS CARACTERISTICAS DEL EFLUENTE DE VARIAS  
 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

| PROCESO   | CALIDAD DEL EFLUENTE RESPECTO AL AFLUENTE   |
|---|---|
| Desarenado  | Remoción de sólidos pesados en suspensión no transportable a una velocidad de 30 cm/seg.  |
| Tratamiento primario  | 25-40% reducción de DBO<br>40-70% reducción de sólidos en suspensión<br>+50% reducción de turbiedad<br>25-75% reducción de bacterias<br>2% reducción de detergentes |
| Sedimentación después de coagulación química                          | 50-85% reducción de DBO<br>70-90% reducción de sólidos en suspensión.<br>40-80% reducción de bacterias  |
| Filtros percoladores con sedimentación secundaria                     | 60-85% reducción de DBO<br>70-90% reducción de sólidos en suspensión<br>90-95% reducción de bacterias   |
| Lodos activados con sedimentación secundaria                          | 70-90% reducción de DBO<br>85-98% reducción de sólidos en suspensión<br>95-98% reducción de bacterias   |
| Lagunas de estabilización   | 75-95% reducción de DBO<br>90-99% reducción de sólidos en suspensión<br>98-99% reducción de bacterias   |
| Filtros rápidos en efluente secundario después de coagulación química | 99.9% reducción de turbiedad<br>90-99% reducción de bacterias   |
| Absorción en carbón activado de efluente de lodos activados           | efluente con:<br>0 - 1 mg/l DBO<br>0.1 - 1 mg/l Turbiedad<br>0 - 1 mg/l sólidos suspendidos<br>0.1 - 1 mg/l fosfatos  |

CUADRO 5.6  
CLASIFICACION DEL RIO DUERO

| ALTERNATIVA | DEL:   | AL<br>KM | CLASE | JUSTIFICACION  | ACCIONES IMPLICADAS  |
|-------------|--------|----------|-------|--|--|
| 100         | 0+000  | 20+700   | D1    | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- La calidad del agua es actualmente similar a la D1.</li> <li>2.- Se puede usar en el futuro como abastecimiento para Zamora o Jacona.</li> <li>3.- Conservar el agua por lo menos al nivel que está a bajo costo.</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Control de las aguas-residuales de: Carapan, Tacuaro, -- Ichán, Huancito, Santo Tomás, Acahuen, -- Tanaquillo, Chilchora y Tangancicuaro. Población total aproximada de 50,000 habitantes de los cuales 18,000 están asentados en las márgenes de los primeros 10 Km y los 32,000 restantes son de Tangancicuaro.</li> </ol>  |
|             | 20+700 | 74+500   | D11   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Conservar el agua para impulsar la granja piscícola</li> <li>2.- Un tratamiento del 60% de las aguas residuales cumple con lo requerido para conservar la calidad del agua como D11.</li> <li>3.- Impulsar la pesca en el río y represas así como en la parte embalsada del río.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1.- Tratar las aguas de Zamora, Jacona, Ariz de Rayón, Estanzuela-San Simón, Ixtlán de los Hervores, La Angostura y El Capulín.</li> <li>2.- Mantener una vigilancia de la calidad mediante un monitoreo continuo</li> <li>3.- Reseembra programada de peces a lo largo del río y embalse.</li> <li>4.- Mantener un buen control de aplicación -- para plaguicidas y -- fertilizantes.</li> </ol> |

CUADRO 5.6.  
CLASIFICACION DEL RIO DUERO (CONT.)

| ALTERNATIVA | DEL<br>KM | AL<br>KM | CLASE | JUSTIFICACION   | ACCIONES IMPLICADAS  |
|-------------|-----------|----------|-------|---|--|
| 2           | 0+000     | 20+700   | D11   | <p>1.- Calidad actual similar o mejor.</p> <p>2.- Menor grado de tratamiento para conservar la calidad.</p> | 1.- Controlar y tratar las principales aguas residuales de Chilchota y Tangancicuaro.  |
|             | 20+700    | 74+500   | D111  | 1.- El principal uso es el riego agrícola en este tramo.  | <p>2.- Tratar las aguas residuales de Zamora y Jacona.</p> <p>2.- Programar el tratamiento progresivo de Arío de Rayón, Estanzuela--San Simón e Ixtlán de los hervores.</p> <p>3.- Observar una vigilancia periódica de la calidad de las aguas mediante monitoreo continuo.</p> |

**CUADRO 5.7**  
**RESULTADOS DEL MODELO PARA EL**  
**60, 80 y 90% DE REMOCION**

| 1     | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7               | 8               | 9     |
|-------|------|------|------|------|------|-----------------|-----------------|-------|
| tramo | K    | r    | Dist | t    | 3-2  | e <sup>Kr</sup> | e <sup>rt</sup> | 7-8   |
| AB    | 0.80 | 3.76 | 5.1  | 0.11 | 2.96 | 0.916           | 0.661           | 0.255 |
| AC    | 0.80 | 3.76 | 10.6 | 0.22 | 2.96 | 0.839           | 0.437           | 0.402 |
| AD    | 0.80 | 3.76 | 16.6 | 0.35 | 2.96 | 0.756           | 0.268           | 0.488 |
| AE    | 0.80 | 3.76 | 21.3 | 0.45 | 2.96 | 0.698           | 0.184           | 0.514 |
| EF    | 0.63 | 5.19 | 1.6  | 0.03 | 4.56 | 0.981           | 0.856           | 0.125 |
| EG    | 0.63 | 5.19 | 7.8  | 0.16 | 4.56 | 0.904           | 0.436           | 0.468 |
| EH    | 0.63 | 5.19 | 10.3 | 0.22 | 4.56 | 0.871           | 0.319           | 0.552 |
| EI    | 0.63 | 5.19 | 14.8 | 0.31 | 4.56 | 0.823           | 0.200           | 0.623 |

| 60% DE REMOCION |      |     |       |       |       |       |            |     |       |
|-----------------|------|-----|-------|-------|-------|-------|------------|-----|-------|
| 10              | 11   | 12  | 13    | 14    | 15    | 16    | 17         | 18  | 19    |
| tramo           | L    | DO  | 2x11  | 13/6  | 14x9  | 12x8  | 15+16<br>D | OD  | Punto |
| AB              | 19.4 | 2.0 | 15.52 | 5.243 | 1.337 | 1.322 | 2.7        | 4.9 | B     |
| AC              | 19.4 | 2.0 | 15.52 | 5.243 | 2.108 | 0.874 | 3.0        | 4.6 | C     |
| AD              | 19.4 | 2.0 | 15.52 | 5.243 | 2.559 | 0.536 | 3.1        | 4.9 | D     |
| AE              | 19.4 | 2.0 | 15.52 | 5.243 | 2.695 | 0.368 | 3.1        | 4.5 | E     |
| EF              | 11.2 | 2.6 | 7.056 | 1.547 | 0.193 | 2.226 | 2.4        | 5.2 | F     |
| EF              | 11.2 | 2.6 | 7.056 | 1.547 | 0.724 | 1.134 | 1.9        | 5.7 | G     |
| EH              | 11.2 | 2.6 | 7.056 | 1.547 | 0.854 | 0.829 | 1.7        | 5.9 | H     |
| EI              | 11.2 | 2.6 | 7.056 | 1.547 | 0.964 | 0.520 | 1.5        | 6.1 | I     |

CUADRO 5.7  
 RESULTADOS DEL MODELO PARA EL  
 60, 80 y 90% DE REMOCION (CONT.)

| 80% DE REMOCION |      |     |       |       |       |       |       |     |       |
|-----------------|------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| 20              | 21   | 22  | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28  | 29    |
| Tramo           | L    | D.  | 2x21  | 23/6  | 24x9  | 22x8  | 25+26 | OD  | Punto |
| AB              | 10.9 | 1.8 | 8.72  | 2.946 | 0.751 | 1.190 | 1.9   | 5.7 | B     |
| AC              | 10.9 | 1.8 | 8.72  | 2.946 | 1.184 | 0.787 | 2.0   | 5.6 | C     |
| AD              | 10.9 | 1.8 | 8.72  | 2.946 | 1.438 | 0.482 | 1.9   | 5.7 | D     |
| AE              | 10.9 | 1.8 | 8.72  | 2.946 | 1.514 | 0.331 | 1.8   | 5.8 | E     |
| EF              | 6.8  | 1.6 | 4.284 | 0.939 | 0.117 | 1.370 | 1.5   | 6.1 | F     |
| EF              | 6.8  | 1.6 | 4.284 | 0.939 | 0.439 | 0.698 | 1.1   | 6.5 | G     |
| EH              | 6.8  | 1.6 | 4.284 | 0.939 | 0.518 | 0.510 | 1.0   | 6.6 | H     |
| FI              | 6.8  | 1.6 | 4.284 | 0.939 | 0.585 | 0.320 | 0.9   | 6.7 | I     |

| 90% DE REMOCION |     |     |       |       |       |       |            |     |       |
|-----------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|------------|-----|-------|
| 30              | 31  | 32  | 33    | 34    | 35    | 36    | 37         | 38  | 39    |
| Tramo           | L.  | D.  | 2x31  | 33/6  | 34x9  | 32x8  | 35+36<br>D | D   | Punto |
| AB              | 6.7 | 1.8 | 5.36  | 1.811 | 0.462 | 1.190 | 1.7        | 5.9 | B     |
| AC <sup>c</sup> | 6.7 | 1.8 | 5.36  | 1.811 | 0.728 | 0.787 | 1.5        | 6.1 | C     |
| AD              | 6.7 | 1.8 | 5.36  | 1.811 | 0.884 | 0.482 | 1.4        | 6.2 | D     |
| AE              | 6.7 | 1.8 | 5.36  | 1.811 | 0.931 | 0.331 | 1.3        | 6.3 | E     |
| EF              | 4.6 | 1.2 | 2.898 | 0.636 | 0.080 | 1.027 | 1.1        | 6.5 | F     |
| EG              | 4.6 | 1.2 | 2.898 | 0.636 | 0.298 | 0.523 | 0.8        | 6.8 | G     |
| EH              | 4.6 | 1.2 | 2.898 | 0.636 | 0.351 | 0.383 | 0.7        | 6.9 | H     |
| EI              | 4.6 | 1.2 | 2.898 | 0.636 | 0.396 | 0.240 | 0.6        | 7.0 | I     |

CUADRO 5.8  
VARIACION DE LA DBO EN EL RIO DUERO PARA EL 60, 80 y 90% DE REMOCION

|       |      |      |                    | 60% REMOCION |                   | 80% REMOCION |                   | 90% REMOCION |                   |       |
|-------|------|------|--------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|-------|
| 1     | 2    | 3    | 4                  | 5            | 6                 | 7            | 8                 | 9            | 10                | 11    |
| Tramo | K    | t    | $\frac{e^{kt}}{k}$ | L            | $5 \times 4$<br>y | L            | $7 \times 4$<br>y | L            | $9 \times 4$<br>y | Punto |
| AB    | 0.80 | 0.11 | 0.916              | 19.4         | 17.8              | 10.9         | 10.0              | 6.7          | 6.1               | B     |
| AC    | 0.80 | 0.22 | 0.839              | 19.4         | 16.3              | 10.9         | 9.1               | 6.7          | 5.6               | C     |
| AD    | 0.80 | 0.35 | 0.756              | 19.4         | 14.7              | 10.9         | 8.2               | 6.7          | 5.1               | D     |
| AE    | 0.80 | 0.45 | 0.698              | 19.4         | 13.5              | 10.9         | 7.6               | 6.7          | 4.7               | E     |
| EF    | 0.63 | 0.03 | 0.981              | 11.2         | 11.0              | 6.8          | 6.7               | 4.6          | 4.5               | F     |
| EG    | 0.63 | 0.16 | 0.904              | 11.2         | 10.1              | 6.8          | 6.1               | 4.6          | 4.2               | G     |
| EH    | 0.63 | 0.22 | 0.871              | 11.2         | 9.8               | 6.8          | 5.9               | 4.6          | 4.0               | H     |
| EI    | 0.63 | 0.31 | 0.823              | 11.2         | 9.2               | 6.8          | 5.6               | 4.6          | 3.8               | I     |

FIG 5.1 OPCIONES EN PROCESOS DE TRATAMIENTO

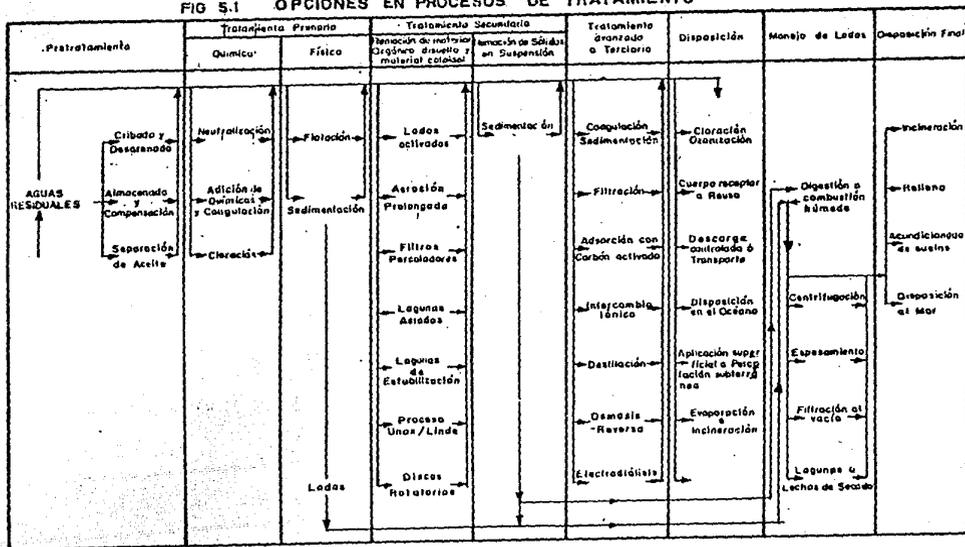


FIG 5.2 ESQUEMA DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS CONVENCIONAL

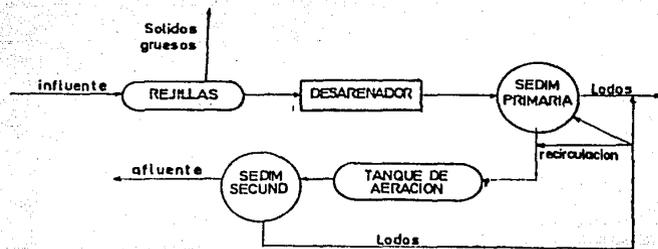


FIG 5.3 ESQUEMA DEL PROCESO DE DISCOS BIOLÓGICOS Y MODULO TIPO

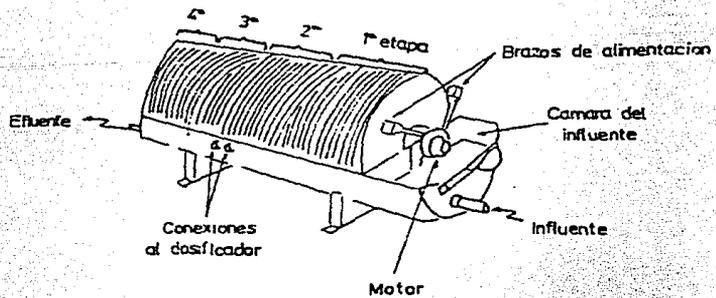
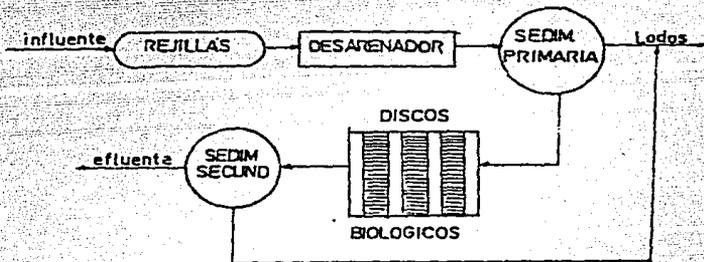


FIG. 5.4

ESQUEMAS COMUNES DEL PROCESO DE ZANJAS DE OXIDACION

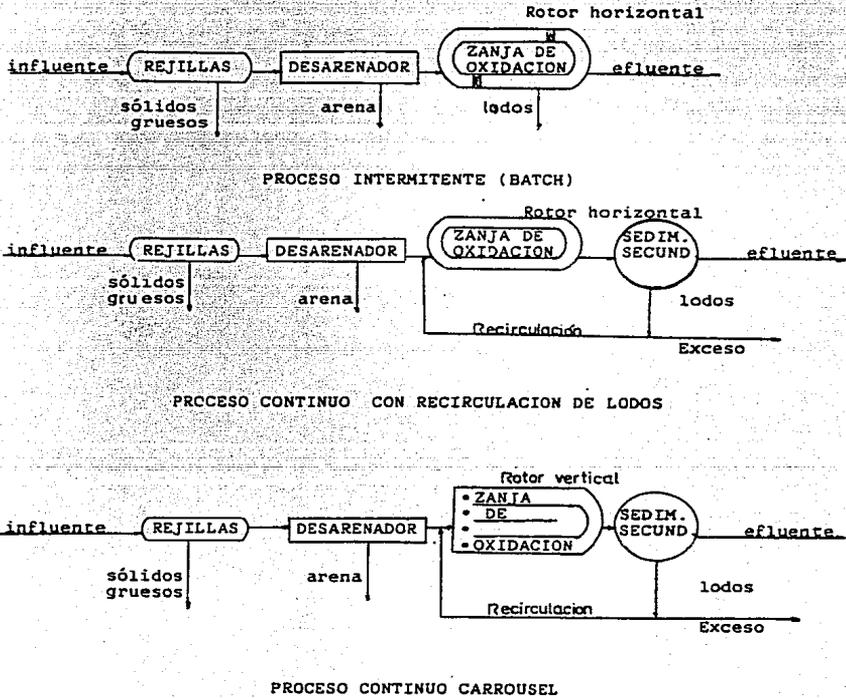
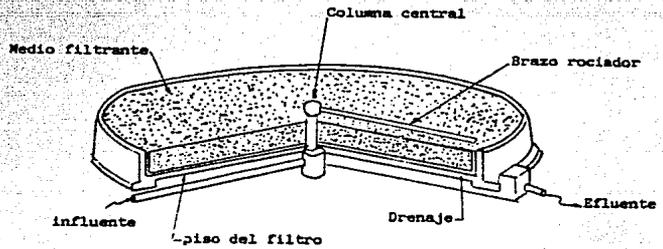
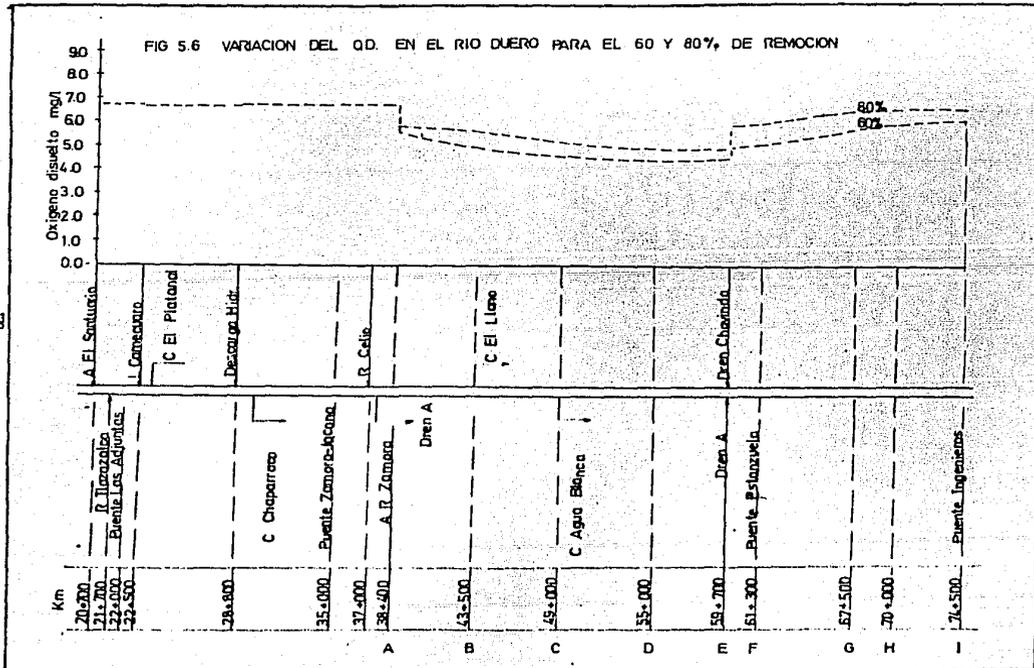


FIG. 5.5.  
CORTE ESQUEMATICO DE UN FILTRO  
ROCIADOR





## CAPITULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con los datos obtenidos y las evaluaciones realizadas tanto en forma directa como mediante el modelo, se tienen las siguientes conclusiones y recomendaciones.

#### 6.1 CONCLUSIONES

- 1) En los primeros 38 kilómetros la calidad de las aguas del río se encuentran dentro de los límites permisibles para una clasificación DI. El pH está entre 6.0 y 9.0; el oxígeno es mayor de 4.0 mg/l; la concentración de coliformes es menor de 1,000 organismos fecales por 100 mililitros, y todas las demás características están por debajo de los límites establecidos en la tabla número 2 del Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación de Aguas.
- 2) Los manantiales de Carapan que dan origen al río adolecen de protección sanitaria para prevenir su contaminación desde los inicios de su escurrimiento.
- 3) Las siete poblaciones de mayor importancia por su cantidad de población no cuentan con tratamiento de aguas residuales.
- 4) La actividad industrial no representa un factor predominante que incida en la calidad del agua.
- 5) El principal uso de las aguas es el riego de cultivos en el Distrito de Riego No. 61.
- 6) La generación de energía eléctrica es un uso económicamente relevante y no consume agua, antes bien, aumenta su concentración

de oxígeno y disminuye la DBO por la sedimentación efectuada en la presa de almacenamiento antes de la llegada a la planta "El - Platanal".

7) Debido a los orígenes del río, el volumen de escurrimiento no disminuye mucho en relación a los gastos "medios normales" y "mínimos".

8) Un uso específico de estas aguas es en la producción y cría de peces en una granja piscícola (km. 64 + 000).

9) La descarga de agua residual proveniente de la ciudad de Zamora es la que causa el mayor efecto negativo en la concentración de oxígeno disuelto en el río.

10) La concentración más baja de oxígeno disuelto fue medida en la estación Estanzuela-San Simón, con un valor de 3.0 mg/l en -- época de estiaje.

11) Los escurrimientos a partir del kilómetro 21, son controlados por la operación del Distrito de Riego.

12) Los principales drenes de agua de retorno agrícola son el - Dren "A" y el Dren Chavinda que se unen al Duero en el kilómetro 59 + 700 cerca del poblado de Colongo.

13) Un tratamiento del 60% mantiene la concentración de OD por - arriba de 4.0 mg/l.

14) Un tratamiento a base de lagunas para la población de Zamora no sería conveniente por el sitio actual de descarga y los -- costos del terreno que ocuparía.

15) Los canales del Distrito de Riego No. 61 se notan azolvados en sus partes bajas.

- 16) Algunos drenes como el denominado "A" se utilizan también para distribuir agua con fines de riego.
- 17) A partir del kilómetro 74 + 500 el río se embalsa por el control de su desfogue por una compuerta de agujas ubicada en Barraje de Ibarra.
- 18) Con el fin de mantener un cierto nivel freático en la ciénega de Chapala, las aguas excedentes se captan en la estación de bombeo "Ingeniero Ballesteros" y se descargan al cauce del río cerca del poblado "El Capulín".
- 19) Las aguas freáticas descargadas al río afectan su calidad por el grado de descomposición anóxica que presentan.
- 20) Durante el período de reconocimiento se observaron las aguas freáticas que se vertían al Duero encontrándose de color negro y con olores desagradables.
- 21) Durante el muestreo, el nivel de las aguas freáticas se encontró por debajo del nivel máximo, por lo cual no hubo descargas de excedencias.
- 22) Las aguas del río parecen presentar características tales que afectan negativamente el crecimiento del nivel heterotrófico primario, representado por el zooplancton, debido posiblemente a compuestos tóxicos procedentes de industrias y de actividades agrícolas de la zona.
- 23) Un problema que se ha iniciado en los últimos años es el abatimiento del oxígeno disuelto a la altura de Estanzuela-San Simón por abajo de la norma establecida en el Reglamento de Aguas de Riego, que es el 3.2 mg/l. Esto obliga a tratar las aguas residuales que llegan al cauce para conservar la calidad.

24) Durante el muestreo se tuvo conocimiento de que en la granja piscícola hubo mortandad de peces por el abatimiento del oxígeno disuelto en la corriente alimentadora.

25) Actualmente, la calidad del agua del río es capaz de sostener una comunidad biológica, aunque se limite su desarrollo, sin embargo, se hace necesario evaluar de manera precisa algunos parámetros, principalmente químicos y biológicos que pudieran explicar más claramente el comportamiento de las poblaciones, así como completar un ciclo anual que delimite los cambios naturales y los originados por contaminantes, que pudieran ejercer presiones negativas sobre la calidad del agua.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- 1.- Tratar las aguas residuales de las siete poblaciones más densamente pobladas de la cuenca: Zamora, Jacona, Chilchota, Tangancicuaro, Ciudad Gómez Palacios, San Simón-Estanzuela y Ario de Rayón.
- 2.- Promover el alcantarillado y tratamiento de aguas residuales de las poblaciones: Carapan, Tacuaro, Ichan, Huancito, Acachuen, Santo Tomás, Tanaguillo y Uran, que forman prácticamente un sólo asentamiento y se encuentran en las márgenes del río.
- 3.- Establecer un programa de supervisión y control de aplicación de pesticidas en el Distrito de Riego para evitar el mal uso de los mismos y prevenir la contaminación del agua por estas sustancias químicas..
- 4.- Promover mediante mano de obra la remoción del lirio acuático y su incorporación al suelo en el área cercana a Ario de Rayón.
- 5.- Promover el desazolve de drenes y canales para coadyuvar a un mejor escurrimiento hidráulico en el Distrito de Riego y por-

ende, una mejor calidad.

6.- Desarrollar un programa de promoción para granjas piscícolas por la menor cantidad de agua utilizada en comparación con el riego de cultivos.

7.- Establecer un programa de monitoreo mediante tres estaciones con mediciones mensuales para el control de la calidad del agua.

Las tres estaciones propuestas y su justificación, son:

Estación 1. - Puente Etucuario.

Localización: Puente carretera de terracería que va de la carretera Zamora-Carapan a Etucuario.

Justificación: El río lleva en este punto un volumen considerable de escurrimiento después de captar los manantiales y arroyos que lo forman. El puente presenta condiciones estructurales convenientes y sería un punto testigo antes de cualquier descarga de agua residual.

Estación 2. - Puente Las Adjuntas.

Localización: Puente carretera Zamora-Zacapu en su cruce con el río.

Justificación: Se captaría la calidad del agua que dá origen al Distrito de Riego No. 61, después de la confluencia del arroyo El Santuario y del río Tlazazalca. Existe además, en este sitio, una estación hidrométrica que facilitaría la medición del caudal.

Estación 3. - San Simón-Estanzuela.

Localización: Puente que comunica los poblados de San Simón y Estanzuela.

Justificación: Registro de la calidad después de recibir las des

cargas de agua residual de Zamora y Jacona, así --  
como los drenes de retorno "Chavinda" y "Dren A".  
La estación hidrométrica se localiza en este sitio  
facilitando la medición de gastos. Se tendría ---  
continuidad con el monitoreo efectuado anteriormen  
te.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- S.A.R.H. Estudio y evaluación mediante indicadores del grado de contaminación de aguas en las cuencas del país. México, 1973.
- 2.- S.A.R.H. Estudio de la calidad del agua en algunos ríos de la República Mexicana. México, 1974.
- 3.- S.P.P. Cómo es México. 1978.
- 4.- Bassols B.A. Recursos Naturales de México. Ed. Nuestro --- Tiempo. México, 1976.
- 5.- S.A.R.H. Boletín Hidráulico No. 51.
- 6.- Fair, Geyer y Oklun. Purificación de aguas y tratamiento - y remoción de aguas residuales. Edit. Limusa. México, 1984.
- 7.- Metcalf and Eddy Boston. Wasterwater engineering, treatmen, disposal, reuse. . Edit. Mc Graw Hill. 1972.
- 8.- Murguía Vaca E. Evaluación, efectos y solución de la conta minación del agua. Fac. Ingenieria U.N.A.M. México, 1983.
- 9.- S.A.R.H. Metodología para determinar las constantes de --- desoxigenación ( $K_d$ ), remoción de DBO ( $K_r$ ) y reoxigenación - ( $K_2$ ) en una corriente. México, 1977.
- 10.- S.A.R.H. Dirección General de Protección y Ordenación Eco- lógica. Ley Federal de Aguas. México, 1971.
- 11.- S.A.R.H. Dirección General de Protección y Ordenación Eco- lógica. Ley Federal de Protección al Ambiente. México, 1982.
- 12.- S.A.R.H. Dirección General de Protección y Ordenación Eco- lógica. Reglamento para la Prevención y Control de la Con- taminación de Aguas. México, 1973.