

INFORME SUPLEMENTARIO VI

SIMULACION DE LA CONTAMINACION

RESUMEN

Los efluentes domésticos e industriales constituyen las principales fuentes de contaminación en la cuenca del lago Ypacarai. En el presente informe se ha estudiado y evaluado la aplicabilidad, en la cuenca, de los métodos de tratamiento de desagües domésticos por infiltración en suelo, y efluentes industriales por poza de oxidación (uno de los tratamientos por proceso de laguna) instalada en un matadero de la zona.

Para el estudio de la capacidad de tratamiento por infiltración en el suelo, se instaló un sistema en la policía de la ciudad de Areguá, sistema que consta de un tanque séptico con dos zanjas de 10 metros de longitud. El suelo de la cuenca se caracteriza por los valores bajos de CEC y PAC, por ser suelo arenoso. Los resultados de las pruebas han demostrado alta efectividad de eliminación del BOD y COD; sin embargo, debido a las propiedades de CEC y PAC, casi no se eliminó el fósforo ni el nitrógeno. Por lo tanto, se considera que el suelo no es apto para aplicar este tipo de tratamiento de desagüe.

Las pozas de oxidación constituyen el método de tratamiento de aguas residuales más difundido en Paraguay. Sin embargo, en una prueba efectuada en una poza con el sistema de aspersion instalada en un matadero de Areguá, no se obtuvieron grandes efectos de purificación de agua residual debido a su alta concentración. Por lo tanto, para tratar los efluentes descargados de los mataderos que se hallan uno en cada ciudad, cuya carga es alta para el lago, es necesario mejorar el proceso de los mataderos para prevenir la mezcla de la sangre en las aguas servidas. Al mismo tiempo, se recomienda estudiar la posibilidad de transformar la sangre en alimentos, y de reunir los mataderos dispersos en un bloque para administrar en forma colectiva la planta de tratamiento.

INTRODUCCION

El hombre, desde su aparición en la tierra hasta el día de hoy, ha venido deshaciendo innumerables materias generadas por sus actividades. Como consecuencia de ello, ha deteriorado el ambiente natural contaminando el aire, agua y otros componentes de la naturaleza, hasta que hoy día hemos de pagar por ello.

La causa principal de este deterioro es, en breves palabras, el incremento notable de la carga generada con el crecimiento acelerado de las industrias, aparición de materiales de deshecho de alta concentración, el incremento de consumo de artículos y de agua, y por lo tanto, el incremento de agua residual. Todo ello fue descargado en forma intensiva, en un breve período en la historia de la naturaleza.

En el presente estudio se han realizado pruebas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, que constituyen las principales fuentes de contaminación del lago Ypacaraí, utilizando instalaciones de bajo costo, y se han estudiado su aplicabilidad en la cuenca, además de estudiar otros métodos de tratamiento que podrían solucionar el problema.

SIMULACION DE LA CONTAMINACION

CAPTULO I COMPOSICION DE LA SIMULACION DE LA CONTAMINACION

1.1 Objetivo del Análisis por Simulación	VII - 1
1.2 Proceso de Análisis del Modelo Matemático	VII - 1
1.3 Objetivos y Detalles del Análisis	VII - 1
1.4 Composición Básica del Modelo de la Contaminación del Agua	VII - 1

CAPTULO II DETERMINACION DEL MECANISMO DEL MODELO NUMERICO

2.1 Característica de la Contaminación del Lago Ypacarai	VII - 3
2.2 Selección del Modelo y de los Indices del Cálculo	VII - 7
2.3 Determinación de los Factores Cronológicos y Espaciales para el Modelo de la Carga de Entrada	VII - 7
2.4 Determinación de los Factores Cronológicos y Espaciales para el Modelo del Balance de Agua del Lago	VII - 8
2.5 Determinación de los Factores Cronológicos y Espaciales para el Modelo de la Transformación de Materias dentro del Lago	VII - 8

CAPTULO III PREPARACION Y VERIFICACION DEL MODELO DE LA CARGA DE ENTRADA

3.1 Generalidades	VII - 11
3.2 Ecuaciones Básicas del Modelo de la Carga de Entrada	VII - 12
3.3 Entradas y Constantes para el Modelo de la Carga de Entrada	VII - 14
3.4 Resultados	VII - 15

CAPITULO IV PREPARACION Y VERIFICACION DE LOS MODELOS
DEL BALANCE DE AGUA Y DE TRANSFORMACION
DE MATERIAS

4.1 Ecuaciones Básicas del Modelo del Balance de Agua del lago	VII - 17
4.2 Ecuaciones Básicas del Modelo de Transformación de Materias dentro del Lago	VII - 18
4.3 Entradas y Constantes de los Modelos del Balance del Agua y de la Transformación de Materias	VII - 21
4.4 Simulación de la Calidad de Agua del Lago Ypacarai	VII - 26

CAPITULO V PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

5.1 Análisis de las Causas de la Contaminación por Medio de Modelos Matemáticos	VII - 28
5.2 Estimación del Incremento Anual de la Sedimentación	VII - 29
5.3 Balance Anual de los Materiales Contaminantes	VII - 29
5.4 Determinación de las Condiciones de Cálculo de Predicción	VII - 30
5.5 Resultados de Cálculos de Predicción	VII - 30

CAPITULO VI CONCLUSIONES VII - 31

CAPITULO VII TEMAS FUTUROS

7.1 Problemas en la simulación de la Calidad de Agua	VII - 32
7.2 Orientación de las Medidas contra la Contaminación	VII - 32

ANEXO VII - 34

LISTA DE TABLAS

S7.1.1	Numerical Value Model Objectives and Content	VII - 41
S7.2.1	Classification of Lake Water Quality Prediction Model	VII - 42
S7.2.2	Constitution of Water Polutant Matters of Lake Ypacarai	VII - 42
S7.3.1	Weighted Coefficient by Thiesen Method	VII - 43
S7.3.2	Coefficient for Seasonal Variation of Standard Specific Discharge	VII - 43
S7.3.3	Constants Related to Flow Amount	VII - 44
S7.3.4	Inflow rate of discharged load from point sources in fine weather	VII - 44
S7.3.5	Inflow rate of discharged load from Non-Point Sources in Fine Weather	VII - 45
S7.3.6	Rate of Decomposition and Loss of Remnaut Load	VII - 45
S7.3.7	Annual Inflow Water	VII - 46
S7.3.8	Annual Inflow Load	VII - 46
S7.A.1	Phenomena related to Lake Water Quality Variation	VII - 47
S7.A.2	Inflow River Low Marsh Summary	VII - 47
S7.A.3	Ellution Rate of Lake Bottom Material	VII - 48
S7.A.4	Sedimentation Materials	VII - 48

S7.A.5	Settlement Velocity Calculation Results (SS)	VII - 48
S7.A.6	Settlement Velocity Results	VII - 49

LISTA DE FIGURAS

S7.1.1	Flow Chart on Lake Water Pollution Elements	VII - 51
S7.1.2	Process of Analysis by Numerical Models	VII - 52
S7.1.3	Basic Pollution Model of Lake Ypacarai	VII - 2
S7.2.1	Water Pollution in Lake Ypacarai	VII - 53
S7.2.2	Drainage System of the Lake Ypacarai	VII - 53
S7.2.3	Structure of Water Balance in the Lake Ypacarai	VII - 54
S7.2.4	Structure of Water Quality in the Lake Ypacarai	VII - 54
S7.3.1	Classification of run-off Water	VII - 55
S7.3.2	Inflow Contamination Load Model	VII - 56
S7.3.3	Functions for Runoff of Storm Water	VII - 57
S7.3.4	Annual Quantity of Flow (in the Lake) from the Basins	VII - 58
S7.3.5	Simulation Results	VII - 59
S7.3.6	Annual Water Quality & Load by Mathematical Simulation	VII - 60
S7.4.1	Structure of Water Balance in the Lake Ypacarai	VII - 61
S7.4.2	Water Balance in the Ypacarai	VII - 61
S7.4.3	Structure of Intra-Lake Matter Transformation Model	VII - 62

S7.4.4	Annual Variation by Simulationel	VII - 63
S7.5.1	Estimation of Lake Water Quality by Mathematical Simulation Method	VII - 64
S7.5.2	Annual Mass Balance of Pollutants	VII - 65
S7.5.3	Estimation of Variation of COD Annual Average	VII - 66
S7.A.1	Relationship between purification and water flow per unit area	VII - 67
S7.A.2	Relationship between Wind Velocity and turbidity	VII - 68
S7.A.3	Settlement Catcher Instrument and Installation	VII - 69
S7.A.4	Results of experiments on Sedimentation	VII - 70
S7.A.5	Reduction of Illumination in Lake	VII - 71

CAPITULO I

COMPOSICION DE LA SIMULACIÓN DE LA CONTAMINACION

1.1 Objetivo del análisis por simulación

Generalmente, la calidad de agua de lagos cambia por efectos de la complicada combinación de factores tales como : i) hidrología y meteorología, ii) característica de la cuenca y carga de entrada, iii) topografía del lago, iv) cambios en el lago por los fenómenos biológicos, químicos e hidráulicos. En la simulación de la contaminación, se realiza el análisis de sistemas utilizando un modelo numérico sobre los factores de la contaminación del agua que participan en forma compleja, con el fin de simular el microcosmo que consiste en los factores como circulación del agua en la cuenca, entrada de la carga de contaminación al lago, cambios biológicos y químicos en el lago incluyendo ecología del lago.

Los objetivos del análisis por la simulación de contaminación son los siguientes:

- 1) Clarificar el mecanismo y el efecto cuantitativo de los factores de contaminación.
- 2) Realizar el pronóstico de la calidad del agua suponiendo que no se apliquen medidas de control de contaminación.
- 3) Utilizar como un medio de comparación al proponer los planes alternativos sobre el mejoramiento de la calidad del agua. Ver Fig. S7.1.1.

1.2 Proceso de Análisis del Modelo Numérico

El proceso de análisis del modelo numérico se realiza por medio del análisis propuesto en la Fig. S7.1.2.

1.3 Objetivos y detalles del análisis

Los objetivos y análisis por el modelo numérico se muestra en la Tabla S7.1.1.

1.4 Composición básica del modelo de la contaminación de agua

El modelo de la contaminación del agua del Lago Ypacarai consiste en datos de entradas como caudal de entrada, carga de entrada, condiciones

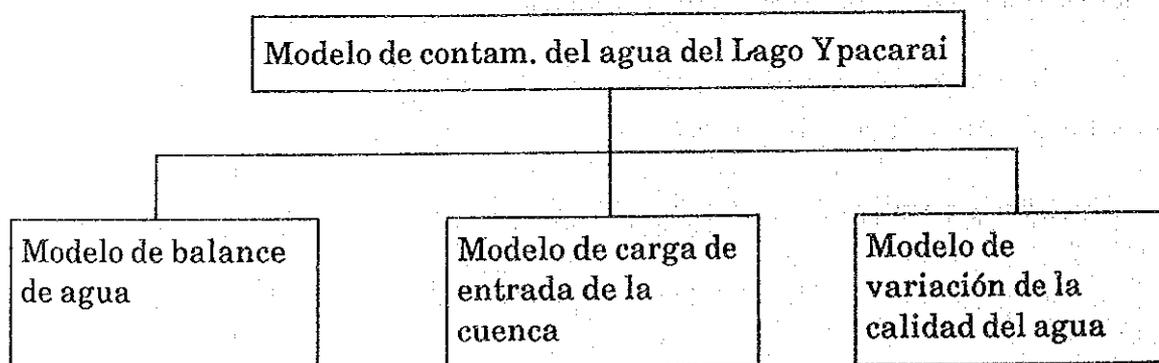
meteorológicas y constantes de reacción de los fenómenos ocurridos en el lago, los cuales servirán para calcular la variación de la calidad del agua en el lago. Este modelo está compuesto del modelo del balance del agua, de la carga de entrada de la cuenca, y de la variación de la calidad del agua en el lago. La Fig. S7.1.3 muestra la composición básica del modelo.

El modelo del balance del agua del lago, consiste en datos de entradas como caudal de entrada del río, precipitación al lago, evaporación de la superficie del lago, volumen de toma del agua y nivel del agua del lago (volumen del agua), con los cuales se calculan el caudal de entrada desde ríos, tiempo de retención del agua en el lago y número de rotación.

El modelo de la carga de entrada de la cuenca consiste en datos de entradas como precipitación en la cuenca, condiciones de generación (uso de la tierra, topografía, etc.,) de fuentes no-puntuales, carga generada por fuentes puntuales, con los cuales se calculan el caudal y carga de entrada al lago.

El modelo de la variación de la calidad del agua expresa cuantitativamente el cambio de la carga de entrada al Lago Ypacarai que ocurre por sedimentación en el lago, descomposición, producción, advección, dispersión, elusión y levantamiento de los sedimentos del fondo del lago.

Fig. S7.1.3 Composición básica del modelo de polución del agua del Lago Ypacarai



CAPITULO II

DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DEL MODELO NUMÉRICO

2.1 Característica de la contaminación del agua del Lago Ypacarai

Los fenómenos y operaciones que se muestran en la Fig. S7.2.1 ilustran el mecanismo de la contaminación del agua del Lago Ypacarai.

(1) Causas principales de la contaminación de aguas

Las causas principales de la contaminación de aguas en el Lago Ypacarai son las siguientes:

- ① Materia orgánica soluble que no se degrada fácilmente, como el ácido húmico que llega arrastrado al lago donde permanece
- ② Algas producidas por eutroficación, y algas muertas
- ③ Sedimentos del fondo del lago agitados por el viento

Factores que afectan la calidad de agua

(2) Las causas arriba mencionadas, actuando en forma simultánea o aislada, son responsables por la baja correlación entre los valores medidos de los indicadores de la calidad de agua.

La persistente materia orgánica soluble es responsable principalmente por la variación en los valores de D-COD. Los factores involucrados son precipitación, escorrentía, carga de entrada y tiempo de retención.

La producción y desintegración de algas resultan en la variación de los valores de P-COD, D-COD, Chl-a y SS. Los factores involucrados incluyen concentraciones de nitrógeno y fósforo, temperatura de agua, radiación solar, velocidad de flujo y tiempo de retención.

La agitación de los sedimentos del lecho lacustre resulta en la variación de los valores de P-COD y SS. Los factores involucrados incluyen velocidades de viento y de flujo, calidad del lecho lacustre y profundidad de agua.

(3) Cambios en la apariencia de agua

Las tres causas de contaminación ya mencionadas también contribuyen a la variación de la apariencia de agua, que se vuelve de color verde cuando la

contaminación se debe a la eutroficación, de color café cuando se debe a la presencia de materias orgánicas persistentes, y de color negrozco cuando se debe a la agitación de los sedimentos del fondo lacustre.

(4) Distribución horizontal

No existen diferencias notables en la distribución horizontal de contaminantes en el lago, por lo cual el area total del lago puede ser considerado como un sólo cuerpo de agua. Se utilizarán los valores medios de calidad de agua en la verificación del modelo.

(5) Distribución vertical

Debido a la reducida profundidad de agua, no existe estratificación térmica en el lago. Aunque existen pequeñas variaciones de valores, por ejemplo de DO, en función de la profundidad, en general no existen diferencias notables en la distribución vertical de contaminantes. Por lo tanto, el modelo será constituido por un sólo estrato.

Sin embargo, se observa claramente la variación en la cantidad de luz que llega a diferentes profundidades. Por lo tanto, la calidad de agua tiene un gran efecto sobre la profundidad en que la producción tiene lugar. Se utilizarán los valores medios de calidad de agua en la verificación del modelo.

(6) Variación temporal o estacional de la calidad de agua

El grado de variación de la calidad de agua resultante de la agitación de sedimentos del fondo lacustre depende en gran medida de la velocidad del viento, mostrando una variación horaria. Los valores de pH y DO indican variaciones diarias. La velocidad de producción de algas por eutroficación varía de acuerdo a las estaciones, aumentando en el verano cuando la temperatura de agua es alta y disminuyendo en el invierno cuando la temperatura de agua es baja.

(7) Remanentes de la carga de entrada

Los valores de COD en el Lago Ypacarai permanecen altos durante todo el año, aún cuando no existe producción de algas ni agitación de sedimentos del lecho lacustre. Esto se considera que se debe a la carga de entrada que permanece en el lago. En otras palabras, se considera que existe una alta

proporción de materia orgánica que no se descompone fácilmente, como el ácido húmico, en la materia orgánica contenida en la carga de entrada.

(8) Estratificación termal de las aguas del lago

La profundidad del lago no es lo suficiente para resistir la mezcla de aguas como efecto de la agitación por vientos. Por lo tanto, no se observa la estratificación por variación de la temperatura de agua, ni siquiera en el verano. Consecuentemente, se puede considerar que el lago consiste de un sólo estrato vertical.

(9) Zona eutrófica

La agitación de los sedimentos del lecho lacustre altera grandemente la cantidad de luz que penetra en las aguas del lago, causando variaciones en las profundidades en que se producen las algas. Estas profundidades deben ser alteradas utilizando coeficientes de reducción de la intensidad luminosa en las aguas en función de la concentración de SS.

(10) Purificación en los humedales

La carga de entrada es purificada en los humedales y llega al lago a una concentración casi constante. Si se designa como C_o la calidad de agua que entra a los humedales, y como C_a la calidad de agua que sale de los humedales, son posibles dos formas de pensar, o C_a tiene una relación funcional con C_o (i.e. $C_a/C_o = k$), o no existe relación alguna entre los dos factores. Los resultados del estudio sobre la calidad de aguas sugieren la segunda posibilidad, pero las muestras analizadas pudieron haber sido afectados por las aguas del lago que como consecuencia de las crecidas retrocedieron hasta los humedales. Por lo tanto, se deben formular dos modelos correspondientes a cada forma de pensar.

(11) Sedimentación

Tanto los SS de la carga de entrada, como los depósitos agitados del lecho lacustre y las algas muertas se sedimentan en el fondo del lago. Los SS de la carga de entrada contienen una alta proporción de partículas coloidales, mientras que las partículas agitadas del fondo son pequeñas, resultando en una lenta velocidad de sedimentación. Esta velocidad debe ser determinada por medio de experimentos. La velocidad de sedimentación de algas en el lago se considera en 0.02 a 0.10 m/día, como generalmente se acepta.

(12) Elución

Se observa la elución de COD, nitrógeno y fósforo generados por la descomposición de materia orgánica contenida en los sedimentos del lecho lacustre. La velocidad de elución debe ser determinada por medio de experimentos. Los factores involucrados incluyen la calidad de los sedimentos y la temperatura de agua. La velocidad de elución aumenta en relación directa con el contenido de materia orgánica de los sedimentos, y con la temperatura de agua.

(13) Producción

Las concentraciones de nitrógeno y fósforo son altas, y se presenta una activa producción de algas en la zona eufótica. Los factores involucrados incluyen temperatura de agua, concentraciones de nitrógeno y fósforo, y amplitud de la zona eufótica. Las algas predominantes son las cianófitas en el verano, y aun en el invierno las cianófitas comprenden alrededor del 50 % de todas las algas producidas. Por consiguiente, la temperatura de agua afecta grandemente la producción de algas.

(14) Agitación de los sedimentos del fondo

Los sedimentos del fondo del lago son agitados por la acción de los vientos. Se considera que este fenómeno ocurre siempre que los vientos soplen a una velocidad igual o superior a 3~5 m/s.

(15) Denitrificación

La baja concentración de TN en las aguas del lago en comparación a los ríos afluentes sugiere la ocurrencia de la denitrificación. Ya que el lago se encuentra permanentemente en un estado aeróbico, se considera que gran parte de la denitrificación ocurre en los humedales.

(16) Convección y Dispersión

Se considera que la convección y la dispersión mantienen la calidad de agua del lago en un estado más o menos uniforme.

(17) Descomposición

La descomposición de las materias orgánicas se debe a la acción de las bacterias. En general, las algas muertas se descomponen de 2 a 8 % por día. Se

considera muy lenta la descomposición de materias orgánicas persistentes contenidas en la carga de entrada.

(18) Precipitación directa

Se utilizará la calidad del agua de lluvias como calidad del agua que entra en forma de precipitación directa.

2.2 Selección del modelo y de los índices del cálculo

① Selección del modelo

La contaminación del agua del Lago Ypacarai no solamente se debe a la eutroficación, sino también está afectada mucho por el levantamiento del sedimento del fondo lacustre causado por los vientos, por lo cual se utiliza el modelo de circulación de sustancias. Este modelo sirve para calcular el balance de masas incluyendo variaciones de la calidad del agua y de la sustancia, a través del modelo de cálculo del balance de agua del lago, modelo de la carga de entrada, y modelo de la transformación de sustancias dentro del lago.

La Tabla S7.2.1 muestra una clasificación de los modelos de predicción de la calidad de agua de lagos.

② Selección de los índices de cálculo

Se han aclarado los componentes de las sustancias principales de la contaminación de agua como se indica en la Tabla S7.2.2 a través del análisis de las características del agua del Lago Ypacarai. En base a esto se utilizan cinco índices : COD, N, P, Chl-a y SS.

2.3 Determinación de los factores cronológicos y espaciales para el modelo de la carga de entrada

① Índices de cálculo

Se utilizan cuatro índices : COD, TN, TP, SS.

② Factores cronológicos

En la carga de entrada, la calidad de agua de río varía mucho entre tiempo seco y tiempo de lluvias, y además varía diariamente, por lo que, la entrada de datos de precipitación se hace por día. Los cálculos de la carga de entrada de

contaminantes se efectúan diariamente, con la separación correspondiente a tiempo seco y tiempo de lluvias.

③ Factores espaciales

Se divide la cuenca del lago en cuatro áreas tomando en consideración la forma de recolección de los datos del estudio. La Fig. S7.2.2 muestra la división de la cuenca.

2.4 Determinación de los factores cronológicos y espaciales para el modelo del balance del agua del lago

① Indices del calculo

Se utiliza un índice de caudal de agua.

② Factores cronológicos

La entrada y el cálculo se ejecuta por día, ya que los datos de la precipitación y nivel de agua (caudal) están tomados diariamente.

③ Factores espaciales

Se divide la cuenca en cuatro áreas en consideración a la forma de compilación de los datos. El lago se trata como una sola área de un sólo estrato ya que la calidad de agua no presenta variación horizontal ni vertical y está mezclada uniformemente.

La Fig. S7.2.3 muestra el diagrama del modelo de balance de agua.

2.5 Determinación de los factores cronológicos y espaciales del modelo de transformación de materias dentro del lago

① Indices del cálculo

Se utilizan cinco índices : COD, TN, TP, SS, Chl-a.

- COD se utiliza para la evaluación general de la calidad de agua.
- SS se utiliza para la evaluación de la turbiedad del agua en el lago.
- En la determinación de la turbiedad, no se tiene en cuenta la diferencia de color (marrón y negro) ya que la distinción entre ellos es difícil.

- SS de algas y SS de la turbiedad se analizan asumiendo que Chl-a y SS de algas guardan una relación proporcional.
- Chl-a se utiliza para la evaluación de la eutroficación.
- El cálculo de la calidad del agua se ejecuta utilizando COD, TN, TP, SS, Chl-a simultáneamente.
- Se considera la composición de COD, TN, TP de acuerdo a los tipos. La relación entre estos es la siguiente:

$$\text{COD} = \text{D} - \text{COD} + \text{P} - \text{COD}$$

$$\text{TN} = \text{D} \cdot \text{TN} (\text{IN} + \text{DON}) + \text{PON}$$

$$\text{TP} = \text{D} \cdot \text{TP} (\text{IP} + \text{DOP}) + \text{POP}$$

② Factores cronológicos

La variación de la calidad de agua del lago se calcula cada 5 días en base a datos sobre volumen de entrada y salida diaria de agua calculado por el modelo de balance de agua y datos sobre la carga diaria calculada por el modelo de la carga de entrada. Se calcula cada 5 días porque todavía no hay suficientes datos sobre la variación de la calidad del agua en el lago, y las ecuaciones de reacción e índices utilizan estimaciones.

③ Factores espaciales

- El Lago Ypacarai se trata como un sólo cuerpo de aguas ya que la calidad del agua en la distribución horizontal es uniforme. La calidad media del agua en el cálculo significa "carga de contaminantes en el lago / volumen del lago".
- En la distribución vertical no se encuentran estratos en el lago debido a la escasa profundidad, por lo cual se trata como un sólo estrato.
- La reacción relacionada a la producción del fitoplancton se trata en dos estratos ya que la zona eufótica varía mucho con la turbiedad.
- La zona pantanosa se considera como una parte del lago, pero la reacción de los humedales se considera individualmente.

Así, el lago se trata como un sólo cuerpo y un sólo estrato de agua, y los humedales se tratan separadamente.

La Fig. S7.2.4 muestra la estructura espacial del modelo de transformación de materias dentro del lago.

CAPITULO III

PREPARACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO DE LA CARGA DE ENTRADA

3.1 Generalidades

① Indices del cálculo

Se utilizan cuatro índices del cálculo : COD, TN, TP, SS.

② Concepto del modelo

- La salida del agua y la de contaminantes se consideran como diferentes fenómenos y se calculan separadamente.
- La salida del agua se clasifica en tres tipos como se muestra en la Fig. S7.3.1.
- Se considera que en la salida de contaminantes, la carga acumulada en la cuenca durante el nivel normal de agua se descarga en tiempos de lluvia de acuerdo al grado de precipitación.

③ Factores cronológicos

Se realiza la entrada de datos de precipitación para la carga de entrada diariamente porque la calidad del agua de ríos afluentes varía notablemente de acuerdo al tiempo y día. El modelo de cálculo de la carga de entrada también efectúa diariamente la computación calculando separadamente la salida en tiempos secos y la salida en tiempo de lluvias. El período considerado abarca desde el 10 de marzo de 1988 hasta el 30 de junio de 1989.

④ Factores espaciales

Se divide la cuenca en 4 áreas considerando la recolección de los datos del estudio.

Se trata como la carga de entrada hasta la zona pantanosa, y esta zona se incluye en el cálculo de la variación de la calidad del agua del lago. La Fig. S7.3.2 muestra un modelo de entrada de carga de contaminantes.

3.2 Ecuaciones básicas del modelo de la carga de entrada

Las ecuaciones básicas del modelo de la carga de entrada son las siguientes y se calcula para cada área.

$$L = L1 + L2 \quad (7 - 3)$$

$$Q = Qa + Qr + Qb \quad (7 - 4)$$

donde,

L : carga de entrada al lago (Kg/día)

L1 : carga de entrada en tiempo bueno (Kg/día)

L2 : carga de entrada durante la lluvia (Kg/día)

Q : caudal de entrada al lago (m³/día)

Qa : caudal de entrada al nivel ordinario de agua (m³/día)

Qr : caudal de salida por la lluvia (m³/día)

Qb : caudal de salida de la descarga artificial (m³/día)

Las ecuaciones de la carga de entrada son las siguientes.

$$L = L1 + L2 \quad (7 - 5)$$

$$L1 = LE \cdot KIE + LD \cdot KID \quad (7 - 6)$$

$$L2 = (LD(1 - KID) + LE(1 - KIE) + LM \Delta T - 1) \cdot f_2 (Ro) \quad (7 - 7)$$

$$LM \Delta T = \{ [LE (1 - KIE) + LD (1 - KID) + LM \Delta T - 1] (1 - K1) \} \quad (7 - 8)$$

donde,

L : carga de entrada (Kg/día)

L1 : carga de entrada en tiempo bueno (Kg/día)

L2 : carga de entrada durante la lluvia (Kg/día)

LE : carga de descarga de fuentes puntuales (Kg/día)

KIE:	relación de escurrimiento de la carga de descarga de fuentes puntuales en tiempo bueno	(-)
LD :	carga de descarga de fuentes no-puntuales en tiempo bueno	(Kg / día)
KID:	relación de escurrimiento de la carga de descarga de fuentes no-puntuales en tiempo bueno	(-)
LM :	carga del remanente acumulado en el área	(Kg)
f ₂ :	función correlativa de la relación de escurrimiento de la carga remanente por lluvia y la precipitación	(-)
K1 :	relación de la descomposición y desaparición de la carga remanente acumulada	(1 / día)
Ro :	precipitación menos volumen de la lluvia ineficaz	(mm / día)

Las ecuaciones de la entrada de agua son las siguientes:

$$Q = Q_a + Q_r + Q_b \quad (7-9)$$

$$Q_a = Q_A \cdot AA \cdot Q_X \cdot 86400 \quad (7-10)$$

$$Q_r = (R - R_A) \cdot AA \cdot K_2 \cdot 10^{-3} \quad (7-11)$$

$$Q_b = Q_B \times K_3 \quad (7-12)$$

donde,

Q :	caudal de entrada de agua desde ríos	(m ³ / día)
-----	--------------------------------------	------------------------

Q _a :	caudal de entrada de agua al nivel ordinario del agua	(m ³ / día)
------------------	---	------------------------

Q _r :	caudal de salida temporal por la lluvia	(m ³ / día)
------------------	---	------------------------

Q _b :	carga de entrada de efluencia artificial	(m ³ / día)
------------------	--	------------------------

Q _A :	caudal específico de referencia	(m ³ / sec · Km ²)
------------------	---------------------------------	---

AA :	superficie del área	(Km ²)
------	---------------------	--------------------

QX :	coeficiente de variación estacional del caudal específico de referencia	(-)
R :	precipitación	(mm / día)
RA :	precipitación ineficaz	(mm / día)
K2 :	relación de salida del agua de lluvia al lago	(-)
QB :	efluencia artificial calculada por unidad básica	(m ³ / día)
K3 :	relación de salida de efluencia artificial al lago	(-)

3.3 Entradas y constantes para el modelo de la carga de entrada

3.3.1 Precipitación

La precipitación de cada área se calcula utilizando el método de polígono Thiessen por la localización de seis observatorios de la cuenca. La entrada de datos de precipitación es diaria. Ver Tabla S7.3.1.

3.3.2 Coeficiente de variación estacional del caudal específico de referencia

Ver Tabla S7.3.2.

*Nota : En las cuencas del Pirayu y Yuquyry los datos se han definido de acuerdo al resultado de la observación del caudal mensual. Los de las cuencas Este y Oeste son valores estimados en base al estudio en el lugar.

3.3.3 Constantes relacionados con el caudal

Ver Tabla S7.3.3.

*Nota : Las constantes se han definido por la verificación a través del cálculo de ensayo en base a los datos del caudal de la condición normal y de inundación del afluente.

3.3.4 Constantes relacionados a la carga

- ① Proporción de la salida de carga de fuentes puntuales al nivel ordinario de agua.

Ver Tabla S7.3.4.

*Nota : Se ha usado el dato real para los efluentes domésticos, y el cálculo de ensayo para los demás.

② Proporción de la salida de carga de fuentes no-puntuales al nivel ordinario de agua.

Ver Tabla S7.3.5.

*Nota : Se ha definido a través de la variación del agua del afluente en tiempo bueno.

③ Proporción de la descomposición y desaparición de la carga remanente

*Nota : Se ha definido considerando la característica de los índices de la calidad de agua.

Ver Tabla S7.3.6.

④ Función de la salida del agua de lluvia

Ver Fig. S7.3.3.

Donde,

$f(R)$: relación de la salida de carga con la precipitación, de 0~1

RK : valor crítico en que toda la carga remanente efluye, aquí 800 mm/día

RA : valor umbral de la precipitación ineficaz por debajo del cual no hay salida, aquí 5mm/día.

n : 1 para COD, TP, SS y 2 para TN, está definido en base al resultado del cálculo de ensayo utilizando los datos observados durante inundaciones.

3.4 Resultados

Los resultados de las cálculos se presentan en las Figuras S7.3.4, S7.3.5 y S7.3.6.

3.4.1 Caudal de entrada anual de los ríos afluentes durante el período comprendido entre marzo de 1988, febrero de 1989

Ver Tabla S7.3.7.

3.4.2 Carga de entrada anual

Ver Tabla S7.3.8.

CAPITULO IV

PREPARACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE BALANCE DE AGUA Y DE TRANSFORMACION DE MATERIAS

4.1 Ecuaciones básicas del modelo de balance de agua del lago

① Mecanismo del modelo de balance de agua

Ver Fig S7.4.1 y Fig. S7.4.2.

② Ecuaciones básicas del modelo de balance de agua

Utilizando como datos de entrada los valores medidos del volumen de entrada desde ríos, nivel de agua, precipitación, volumen de toma de agua y coeficiente de evaporación mensual, se calcula la evaporación de la superficie del lago a partir de la relación entre el nivel de agua y el volumen del lago en función de la superficie del lago, nivel de agua y el coeficiente de evaporación. Se calcula al mismo tiempo el volumen de salida a ríos.

$$dV/dt = IA + R.A - E.A - Ic - Qout \quad (7-1)$$

$$dV/dt = A. (\Delta Ht - \Delta Ht-1) \quad (7-2)$$

donde;

Qout : salida a ríos

IA : entrada desde ríos

R : precipitación

A : area del lago (=59.6km²)

Ic : volumen de toma de agua

ΔV : Variación del volumen de agua del lago

H Δt : nivel del agua (al momento de cálculo)

H $\Delta t-1$: nivel del agua (al momento del cálculo anterior)

4.2 Ecuaciones básicas del modelo de transformación de materias dentro del lago

① Mecanismo básico del modelo de transformación de materias. El modelo de transformación de materias tiene cinco indicadores: COD, TN, TP, Chl-a, SS. Es un modelo integral que incluye la zona eufótica (Fig. S7.4.3).

② Ecuaciones básicas del modelo de transformación de materias

(TN)

$$\frac{d}{dt}(C_N \cdot V) = Q_I \cdot C_{IN} \cdot K_a - Q_0 \cdot C_N - C_N \cdot \beta \cdot V \cdot K_c \cdot \frac{1}{Z} + K_d(\theta_2)^{T-20} \cdot A + K_e \cdot f_5(W \cdot Z)A$$

(Entrada) (Salida)

(Sedimentación) (Elución) (Disturbio)

(TP)

$$\frac{d}{dt}(C_p \cdot V) = Q_I \cdot C_{IP} \cdot K_a - Q_0 \cdot C_p - C_p \cdot \beta \cdot V \cdot K_c \cdot \frac{1}{Z} + K_d(\theta_2)^{T-20} \cdot A + K_e \cdot f_5(W \cdot Z)A$$

(entrada) (salida) (sedimentación)

(elución) (disturbio)

(COD)

$$\frac{d}{dt}(C_c \cdot V) = Q_I \cdot C_{IC} \cdot K_a - Q_0 \cdot C_c - C_c \cdot V \cdot K_f(\theta_3)^{T-20} - C_p \cdot \beta \cdot V \cdot K_c \cdot \frac{1}{Z} + K_d(\theta_2)^{T-20} \cdot A + K_e \cdot f_5(W \cdot Z) \cdot A + C_a \cdot \delta \cdot V$$

(entrada) (salida) (descomposición)

(sedimentación) (elución) (disturbio)

(producción)

(Chl-a)

$$\frac{d}{dt}(Ca \cdot V) = Ca \cdot V \cdot Kf(\theta)^{T-20} - Ca \cdot V \cdot Kc \cdot \frac{1}{Z} - Q_0 \cdot Ca$$

(descomposición) (sedimentación)(salida)

$$+ Ca \cdot \frac{f_6(T_r)}{Z} \cdot V \cdot Kp \cdot f_7(T) \cdot \frac{S}{Ms+S} \cdot \frac{IN}{Mn+IN} \cdot \frac{IP}{Mp+Ip}$$

(producción)

(SS)

$$\frac{d}{dt}(Cs \cdot V) = Q_I \cdot C_{IS} \cdot Ka - Q_0 \cdot Cs - Cs \cdot V \cdot Kc \cdot \frac{1}{Z}$$

(entrada) (salida) (sedimentación)

$$+ Ke f_5(W \cdot Z) A + Ca \cdot \lambda \cdot V$$

(disturbio) (producción)

donde :

C_{IN}	: concentración de IN de entrada	(mg/ℓ)
C_{IP}	: concentración de IP de entrada	(mg/ℓ)
C_{IC}	: concentración de COD de entrada	(mg/ℓ)
C_{IS}	: concentración de SS de entrada	(mg/ℓ)
Q_I	: volumen de entrada	(m ³ /día)
Q_0	: volumen de salida	(m ³ /día)
C_N	: concentración de TN del agua del lago	(mg/ℓ)
C_p	: concentración de TP del agua del lago	(mg/ℓ)
C_c	: concentración de COD del agua del lago	(mg/ℓ)
C_a	: concentración de Chl-a del agua del lago	(mg/ℓ)
C_s	: concentración de SS del agua del lago	(mg/ℓ)
K_a	: coeficiente del remanente de la sedimentación en la desembocadura	(-)

- K_c : coeficiente de la velocidad de sedimentación (l/día)
 K_d : coeficiente de la velocidad de elución del depósito lacustre (mg/m²-día)
 K_e : coeficiencia de la velocidad de disturbio del depósito (mg/m²)
 K_p : coeficiente de la velocidad de producción (l/día)
 $f_5(W,Z)$: función de la influencia del viento y la profundidad del agua en el disturbio del depósito
 $f_6(Tr)$: función del cálculo de la zona eufótica utilizando valores de transparencia
 $f_7(T)$: función del efecto de la temperatura en la producción de las algas
 T : temperatura del agua (°C)
 θ_2 : constante de la temperatura para la velocidad de elución
 θ_3 : constante de la temperatura para la velocidad de descomposición
 α : proporción de IN en el lago
 β : proporción de partículas
 δ : coeficiente de la conversión de Chl-a a COD
 λ : coeficiente de la conversión de Chl-a a SS
 Z : profundidad media del agua (m)
 F : velocidad del viento (m/s)
 S : radiación solar (cal/cm²/día)
 M_s : constante Michaelis para la radiación solar
 M_N : constante Michaelis para IN
 M_p : constante Michaelis para IP

4.3 Entradas y constantes de los modelos de balance de agua y de transformación de materias

4.3.1 Datos de Entrada del modelo de cálculo de balance de agua del lago

① Precipitación

La precipitación en la superficie del lago se calcula de los datos observados en las estaciones meteorológicas, utilizando el método de polígono Thiessen.

② Volumen de entrada

Es el dato proporcionado por el cálculo de la carga de entrada.

③ Evaporación de la superficie del lago

Es el valor de la evaporación durante 10 años, observada en Caacupe, multiplicado por el factor 0.8.

④ Nivel del agua del lago

Se utiliza el indicador de nivel del agua y los datos del nivel del agua registrados en San Bernardino.

⑤ Volumen del lago

Se calcula multiplicando la variación del nivel del agua por el área constante del lago (59.6km²).

⑥ Toma de agua

Se utilizan los datos mensuales de toma de agua registrados en San Bernardino en 1987.

⑦ Volumen de salida

Se calcula de los valores de 1 a 6.

4.3.2 Datos de entrada del cálculo de transformación de materias dentro del lago

(i) (Chl-a)
$$P = \mu_{\max} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N) \cdot \frac{S \cdot V}{Z}$$

Producción

- ① Temperatura de agua y radiación solar

Se utiliza el valor medio de 5 días de los datos reales observados.

- ② Capacidad máxima de la propagación, $\mu_{\max} = 0.41$
- ③ Función dependiente de la temperatura de agua

$$f(T) = \frac{T}{T_s} \left\{ \exp \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \right\}^2$$

Se define la temperatura (T_s) óptima como 27°C en base al dato real observado.

- ④ Función dependiente de la intensidad luminosa

$$f(I) = \frac{I}{I_s + I}$$

Se utiliza la radiación solar para I , en lugar de intensidad de la iluminación, y la radiación solar estandar (I_s) es $400\text{cal/cm}^2/\text{día}$

- ⑤ Función dependiente de la concentración de sales nutrientes

$$f(N) = \frac{C_{IN}}{K_m^N + C_{IN}} \cdot \frac{C_{IP}}{K_m^P + C_{IP}}$$

Constante de semi-saturación: $K_m^N = 0.15$

$$K_m^P = 0.012$$

Se adoptan valores fijos para sales nutrientes utilizando la calidad media anual del agua ($I_N = 0.38\text{mg/l}$, $I_P = 0.025\text{mg/l}$) ya que contiene suficiente I_N y I_P , y no hay posibilidad de su escasez.

- ⑥ Espesor de la zona eufótica (S)

Se tomó el doble del valor de la transparencia, convirtiendo los valores observados a promedios correspondientes a periodos de 5 días.

⑦ Coeficientes de transformación de Chl-a a COD y SS de las algas

(i) $COD/Chl-a = 130$

$SS/Chl-a = 130$

(ii) Descomposición

$$D = (C \cdot V) \cdot K_f \cdot \theta^{T-20}$$

	<u>Coeficiente de Reacción</u> (Kf)	<u>Coeficiente de Temperatura</u> (θ)
Chl-a	0.054	1.024
COD	0.028	1.08

(iii) Elución del fondo lacustre

$$E = K_d A \cdot \theta^{T-20}$$

	<u>Coeficiente de Reacción</u> (Kd)	<u>Coeficiente de Temperatura</u> (θ)
COD	660	1.08
TN	8	1.03
TP	0.45	1.08

(iv) Disturbios del fondo lacustre

$$M = A \cdot f(W, Z) \cdot K_e$$

Se utilizó la siguiente ecuación ya que los disturbios del fondo del lago tienen relación con la velocidad del viento y la profundidad de agua.

$$f(W, Z) = K_e \cdot (2 \cdot W)^{2/z}$$

en donde, W : velocidad media(m/s)

Z : profundidad media(m)

K_e : constante

La constante K_e se define en base a la proporción de los componentes considerando el resultado de la observación del volumen de precipitación de los sedimentos.

Item	Velocidad de Disturbios mg/m ² /día
SS	500
COD	370
TN	6.5
TP	0.55

(v) Sedimentación

$$Se = Kc (c v)/z$$

donde, v: volumen del lago
c: concentración
z: profundidad media

Se define en base a la prueba en terreno.

Item	Velocidad de sedimentación Kc (m/d)
SS	0.17
COD	0.16
N	0.03
P	0.05
Chl-a	0.02

(vi) Otros coeficientes de conversión

1) Tasa de purificación en los humedales

Se utilizan las siguientes ecuaciones para la purificación en los humedales del Yuquyry.

$$f_N(x) = 0.218 + 1.11x - 1.23x^2$$

$$f_P(x) = 0.127 + 4.93x - 10.3x^2$$

$$f_{COD}(x) = 0.48 + 3.32x - 9.09x^2$$

$$f_{SS}(x) = 0.11 + 4.07x - 10.0x^2$$

donde, x : carga media por area en cinco días ($m^3/d/m^2$)

f : proporción del residuo después de la purificación

La tasa de purificación del Pirayú se considera cero porque el efecto de purificación no está esclarecido.

2) Sedimentación alrededor de la desembocadura

Se considera que la mitad de la carga de afluencia de SS se sedimenta alrededor de la desembocadura cuando la precipitación total de cinco días sobrepasa los 40mm. En los demás casos no se considera la sedimentación de desembocadura.

3) Proporción de las partículas

En base al resultado del estudio,

$$PON/TN = 0.44$$

$$P.TP/TP = 0.53$$

$$P.COD/COD = 0.33$$

4) Coeficiente para conversión de Chl-a a SS y COD

$$COD/Chl-a = 130$$

$$SS/Chl-a = 130$$

5) Calidad del agua de la precipitación directa

Se adoptan los datos obtenidos y analizados en San Lorenzo.

$$TN = 1.26 \text{ mg/l}$$

$$TP = 0.010 \text{ mg/l}$$

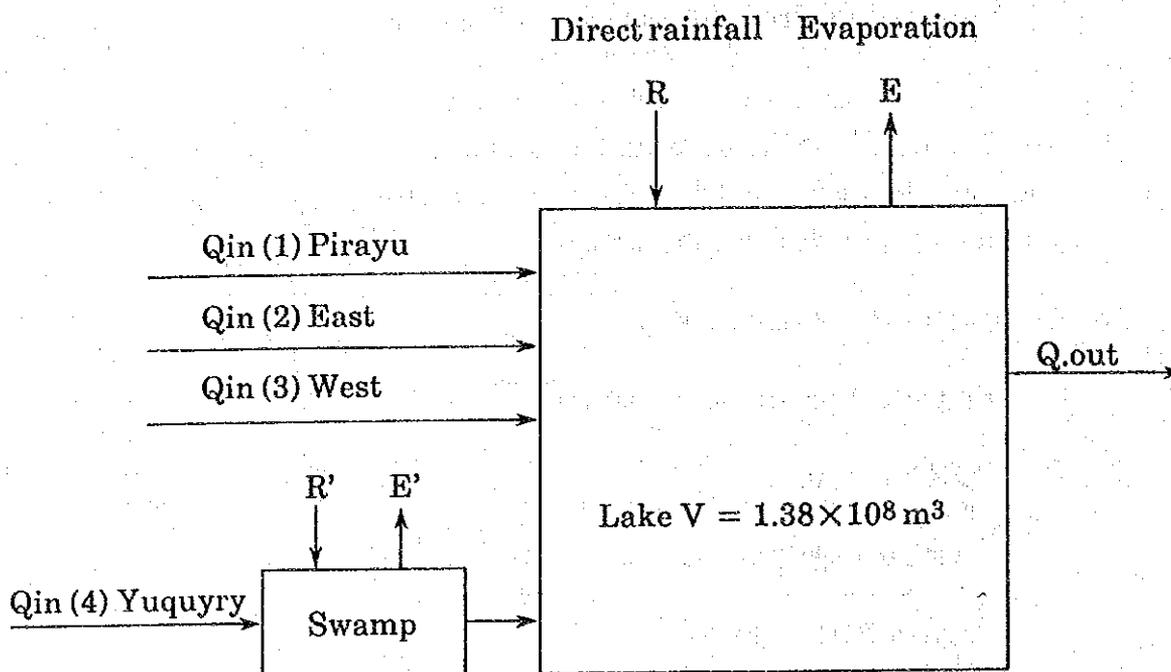
El agua de lluvia con respecto a contenidos de SS y COD se considera como cero.

4.4 Simulación de la Calidad de Agua del Lago Ypacarai

4.4.1 Resultado del cálculo de balance de agua

El resultado del cálculo con Q_{out} como incógnita es como sigue.

Annual Water Balance at the Lake (1988.3 ~ 1989.2)



Item	Numerical Value
Lake Area	59.6 km ²
Lake Volume	* 1.38 × 10 ⁸ m ³
Direct Rainfall	0.88 × 10 ⁸ m ³ (1,479 mm)
Evaporation	0.91 × 10 ⁸ m ³ (1,529 mm)
Q _{in} Total	3.30 × 10 ⁸ m ³
Q _{out} Total	3.28 × 10 ⁸ m ³

* Remarks 1988.3 ~ 1989.2 Average value

Number of rotation of water in the lake

The number of rotations of water in the lake (total Q_{in} /lake volume) is 2.4 times a year.

4.4.2 Resultado del cálculo para la simulación de la calidad del agua

Se indica el resultado del cálculo para la simulación de la calidad del agua en la Fig-S7.4.4. Los puntos graficados con rangos representan los valores medios y rangos de todos los datos de COD, SS y Chl-a.

Se utilizan los valores medios verticales de TN y TP observados en la estación de muestreo No. 25.

4.4.3 Evaluación del cálculo

- * La producción influye mucho en la calidad del agua, sobre todo la amplitud de la zona eufótica es el factor más importante.
- * Se puede considerar que la descomposición de Chl-a significa la destrucción de las algas.
- * En la sedimentación de SS se incluye la conversión de SS a sustancias disueltas por descomposición.
- * Relativamente, el disturbio aumenta en el invierno cuando el viento es más fuerte, y la elución en el verano cuando la temperatura es más alta.
- * La proporción de la carga de entrada es más alta durante las crecidas, constituyendo entre 15 % y 50% de la producción interna del lago.
- * La temperatura, radiación solar y las sales nutrientes conforman condiciones favorables para una rápida producción y descomposición que tienen lugar en el lago.

CAPITULO V

PREDICCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

5.1 Análisis de las causas de la contaminación por medio de modelos matemáticos

Se consideraron cuatro casos con el objeto de analizar el grado de importancia de los factores relacionados con la contaminación (COD, SS Fig. S7.5.1).

5.1.1 Casos

Caso 1

La carga de entrada se reduce a la mitad.

Caso 2

Las concentraciones medias de IN e IP se reducen a la mitad.

Caso 3

Se altera el curso del arroyo Yuquyry, pero se mantiene el nivel actual de las aguas del lago Ypacarai.

Caso 4

La velocidad de producción interna en el lago se reduce a cero (Como se estima que gran parte de la carga de COD es materia de difícil degradación, se asumió que la velocidad de degradación de COD es de 0.01/día).

5.1.2 Resultados

En los casos 1 al 3, la mejora en la calidad de las aguas es muy pequeña. Los resultados del cálculo del caso 4 indican que la velocidad de producción interna influye notablemente en la condición de contaminación del lago. La influencia del levantamiento de los sedimentos del fondo lacustre en los meses de julio a setiembre causa el aumento de la concentración de los materiales contaminantes durante el invierno.

La influencia del Caso 2 se considera que es pequeña porque ya el lago contiene suficiente IN e IP.

5.2 Estimación del incremento anual de la sedimentación

La sedimentación anual de SS, sin contar el volumen del levantamiento del fondo, se ha estimado en 123×10^6 Kg/año, que dividido por el área del lago sin considerar la zona arenosa (53 Km^2) se tiene un valor de $2300 \text{ g/m}^2\text{-SS}$.

La velocidad de sedimentación del fondo lacustre es influenciada por el nivel de consolidación (contenido de agua).

El contenido de agua de los sedimentos del centro del lago es 190% en la superficie, y de 50% a 20 cm debajo de la superficie (análisis de la muestra tomada en julio de 1988).

Si se asume que el peso específico $G_s = 2.5$ y el grado de saturación $S_r = 100\%$,

La relación de porosidad $e = G_s \cdot W / S_r = 1.25 \sim 4.75$

Para la densidad seca $\gamma_d = G_s / (1 + e) = 1.11 \sim 0.435 \text{ g/cm}^3$

Por lo tanto, la sedimentación anual considerando el contenido de agua es:

$$d = \frac{SS \cdot 10^3 (\text{g/m}^2)}{\gamma_d \cdot 10^6 (\text{g/m}^3)} = 2.1 \sim 5.3 \text{ mm/año}$$

De lo cual tenemos 5.3 mm/año de acumulación de sedimentos si se considera la densidad de la superficie, y de 2.1 mm/año si se considera la densidad a 20 cm debajo de la superficie.

Sin embargo, se debe considerar que estos valores no tienen en cuenta la reducción de volumen por descomposición de los sedimentos.

5.3 Balance anual de los materiales contaminantes

En la Fig.S7.5.2 se indica el resultado del balance de los materiales contaminantes de acuerdo con el cálculo para un año.

5.4 Determinación de las condiciones de cálculo de predicción

- ① Año de la predicción 2010
- ② Índice del cálculo COD
- ③ Condición hidrológica y meteorológica

Se asumió que se repiten todos los años la condiciones presentadas del 1 de marzo del 1988 al 28 de febrero de 1989.

④ Condiciones futuras

Caso 1 ----- Se incrementa la carga de entrada a razón de 2% al año.

Caso 2 ----- Se incrementa la velocidad de elución del COD de los sedimentos a razón de 2 % anual, conjuntamente con lo que ocurre en el Caso 1.

5.5 Resultados de cálculos de predicción

Se indican en la Fig. S7.5.3

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

1. Debido a la purificación de las aguas en los humedales, el impacto de la carga de entrada de los contaminantes artificiales de la cuenca del Yuquyry al lago no es tan grande.
2. El agua del lago tiene suficientes condiciones favorables de luz, temperatura, y concentración de sales nutrientes para una rápida producción y degradación interna en el lago, afectando grandemente la calidad de las aguas.
3. La alta concentración de las sales nutrientes en el lago se debe a la entrada por los afluentes que tienen alta concentración de N y P. Aunque los detalles del mecanismo no están claros por el momento, la alta temperatura relativa de la zona degrada rápidamente la parte orgánica de N y P, facilitando su transporte.
4. El cambio promedio de aguas en el lago es de 2 a 3 veces al año, siendo un cuerpo de aguas con lentas entradas y salidas de agua.
5. La mayor parte de las partículas contenidas en la carga de entrada se sedimentan en el proceso de entrada al lago, por lo que su influencia en la calidad del agua es pequeña.
6. De las posibles influencias del sedimento del fondo lacustre, la elución no influye grandemente en la calidad del agua a pesar de la poca profundidad del lago, debido a la condición permanentemente aeróbica de los sedimentos.
Con respecto al levantamiento de sedimentos del fondo se realizaron experimentos para relacionarlo con las olas el viento, pero no se pudo llegar a conclusiones definitivas. Aunque en este fenómeno pueden influir otras causas como la convección, no fue posible aclararlo en el presente estudio.
7. La alta concentración del COD y SS del agua del lago se debe a las algas y sus restos. El color negro de sus aguas se supone que se debe a la carbonización de la materia orgánica ocurrida en el proceso de degradación de los restos de las algas.

CAPITULO VII

TEMAS FUTUROS

7.1 Problemas en la simulación de la Calidad de Agua

1. Se ha aplicado la ecuación del balance de las materias para todos los fenómenos, pero es difícil de aplicar a algunos items que desaparecen por degradación como, por ejemplo, COD y Chl-a.
2. La velocidad de reacción es fundamental ya que se usa como principal indicador la transformación de materias de una forma a otra. Sin embargo, la velocidad de reacción para algunos items no puede ser determinada por medio de experimentos, y existen items para los cuales se pueden obtener solamente datos aproximados (ejemplo, prueba AGP).
3. Existe falta de datos de entrada y de datos de calidad de agua para la simulación del fenómeno actual, por ejemplo, los datos de la calidad de agua para el cálculo por periodos de cinco días fueron tomados de los datos mensuales.
4. El estudio y el análisis requiere de un alto grado de técnica especializada que son difíciles de aplicar, por lo que los resultados del cálculo no siempre reflejan la realidad.
5. Se considera que se obtendrían mejores resultados realizando experimentos de purificación que por medio de cálculos.

En base a lo mencionado, se considera que es necesario mejorar la confiabilidad del resultado de los cálculos, elevando la precisión de las constantes con la realización de estudios subsiguientes.

7.2 Orientación de las Medidas contra la Contaminación

Aunque es adecuado tomar los resultados de la simulación como una simple hipótesis, se puede resumir lo siguiente:

Lo más importante para las medidas contra la contaminación es tomar acciones para reducir las algas.

Todavía quedan muchos puntos oscuros para poder tomar medidas aplicables a la totalidad del lago. Por lo tanto, sería conveniente dar

prioridad a la experimentación en un area pequeña segregada, como por ejemplo alrededor de la toma de agua de la planta de purificación de San Bernardino (las algas causan de vez en cuando problemas de filtración y olores desagradables).

La experimentación se trataría de:

- 1 Oxidación por contacto utilizando un piso fijo
- 2 Aplicación de alguicidas como el sulfato cúprico

ANEXO

ANEXO

ESTUDIOS Y PRUEBAS PARA EL EXAMEN DE LAS CONSTANTES DEL MODELO

A.1 Fenómenos que afectan la calidad de agua del lago

- ① Purificación y sedimentación en humedales
- ② Elución de los sedimentos del fondo del lago
- ③ Agitación de los sedimentos del fondo del lago
- ④ Sedimentación
- ⑤ Producción
- ⑥ Descomposición
- ⑦ Denitrificación

En el Lago Ypacarai se puede ignorar ⑦ ya que los sedimentos del fondo se encuentran siempre en estado aeróbico. Ver Tabla S7.A.1.

A.2 Purificación en humedales

- (1) Características de los humedales de los arroyos Yuquyry y Pirayú

(Ver Tabla S7.A.2).

- (2) Mecanismo de purificación en humedales

- ① SS y Turbiedad

Adherencia a los pelos radicales de las plantas acuáticas y filtración por plantas acuáticas

- ② Materia orgánica

Purificación y descomposición por acción de microorganismos que se encuentran alrededor de plantas acuáticas

- ③ Eliminación de Nitrógeno

Gasificación, denitrificación y dispersión a la atmósfera

④ Eliminación de Fósforo

Igual que SS y Turbiedad

(3) Canales dentro de humedales

El arroyo Yuquyry llega al lago por 4 canales luego de pasar por el humedal formando una compleja red de canales. El humedal del arroyo Pirayu es más pequeño y los canales se distinguen fácilmente.

(4) Velocidad de purificación, residuos de purificación y carga de la superficie acuática

Se considera que la velocidad de purificación en los humedales guarda relación con la carga de la superficie acuática (flujo de agua por unidad de area $m^3/d/m^2$).

La Fig. A.1 muestra la carga media de la superficie acuática por períodos de 5 días en el arroyo Yuquyry y su relación con COD, SS, TN y TP.

A.3 Pruebas de elución de N, P y COD de los sedimentos

Las velocidades de elución de N, P y COD de los sedimentos del fondo del lago se obtuvieron por medio de pruebas de laboratorio.

(1) Método de prueba

Se obtuvo una muestra de sedimentos utilizando un instrumento Ekman-Berge en la estación de muestreo № 25 en julio de 1988. La muestra fue colocada en el fondo de un balde, se agregó agua destilada y se efectuó la prueba de elución en condiciones aeróbicas bajo dos temperaturas: 20°C y 30°C.

(2) Análisis

Se analizaron COD, N y P disueltos en el agua.

(3) Cálculo de la velocidad de elución

$$KR = (C_n - C_o) \times V_n \times \frac{10000}{A} \times \frac{1}{N} \quad \dots \dots \quad (1)$$

N, P

$$KR = (C_n - C_o 10^{-kn}) \times V_n \times \frac{10000}{A} \times \frac{1}{N} \quad \dots \dots \quad (2)$$

COD

* constante de descomposición de sedimentos para COD, $K = 0.03$

donde,

KR_n : elución diaria ($mg/m^2 \cdot día$)

C_0 : concentración en día 0 (mg/l)

C_n, C_{n+1} : concentración en días "n" y "n+1" (mg/l)

V_n, V_{n+1} : cantidad de agua en días "V" y "V+1" (l)

A : área del experimento (cm^2)

$n(n+1) - (n)$: Período de cálculo (días)

(4) Resultados

Ver Tabla S7.A.3

A.4 Estudio sobre agitación de sedimentos

La agitación de sedimentos del fondo por el viento es un fenómeno que ocurre en lagos poco profundos. Gran parte de los materiales agitados vuelve a sedimentarse al cesar el viento, pero una parte puede ser disuelto mientras se encuentra en suspensión en el agua. La agitación de sedimentos debida al viento puede ser expresada por medio de las siguientes ecuaciones.

$$K_V = f(F)$$

$$K_Z = f(K_V)$$

donde,

K_V : cantidad de sedimentos agitados

F : fuerza del viento

K_Z : cantidad de sedimentos disueltos en agua

La Fig. S7.A.2 muestra los resultados obtenidos en las mediciones efectuadas en el Lago Ypacarai en julio de 1988 sobre agitación de sedimentos del fondo por causa del viento. Se hace notar que se presentó un aumento notable de turbiedad en la estación de muestreo Nº 30 entre el 18 y el 19 de julio.

A.5 Observación de la velocidad de sedimentación

① Método de estudio

Se efectuaron mediciones colocando un colector de 24 cm de diámetro (Fig. S7.A.3) en la estación de muestreo Nº 25 (profundidad total 2.9 m) a una profundidad de 2 m, y cambiando el colector cada 24 horas.

Luego de medir la cantidad de agua en los colectores, se realizaron análisis para determinar las cantidades de SS, COD, D-COD, K-N, D-K-N, T-P y D-TP. Los valores de P-COD, P-K-N y P-T-P fueron calculados de los resultados del análisis.

② Resultados del estudio

La cantidad de materias sedimentadas fue calculada del resultado de la determinación de partículas utilizando la siguiente ecuación.

$$M = Ca \times \frac{V}{1000} \times \frac{1}{A} \times \frac{1440}{T}$$

donde,

M : cantidad de sedimentación (mg/m²-día)

Ca : concentración en el colector (mg/ℓ)

V : cantidad de agua en el colector (mℓ)

A : área del colector (m²), A = 0.0452

T : tiempo de recolección (min)

La Tabla A.4 muestra los resultados obtenidos.

③ Cálculo de la velocidad de sedimentación

La sedimentación diaria y la velocidad de sedimentación de SS se calculan con las siguientes ecuaciones.

$$U_r = \frac{M}{C_s \cdot H \cdot 1000}$$

$$U = U_r \cdot H$$

donde,

Ur : sedimentación diaria (ℓ/d)

U : velocidad de sedimentación (m/d)

H : profundidad del colector (m), H = 2.0

M : cantidad de sedimentación (mg/m²/d)

La Tabla S7.A.5 presenta los resultados del cálculo. La naturaleza del experimento deja abierta la posibilidad de inclusión de SS agitados del fondo, introduciendo de esta forma un margen de error a los valores obtenidos.

Los valores de COD, N y P, calculados en la misma forma que en el caso de SS, se presentan en la Tabla S7.A.6.

A.6 Pruebas de sedimentación en laboratorio

La reducción en la concentración de contaminantes en el agua como efecto de la sedimentación de partículas sigue normalmente una curva logarítmica. Se obtuvieron muestras de aguas del lago, de los arroyos afluentes y de sus lechos, observándose la sedimentación durante 24 horas en un cilindro de medición bajo dos condiciones, con y sin mezcla de sedimentos.

La Fig. A.4 muestra los resultados del experimento. La velocidad de disminución en la sedimentación de SS en agua con mezcla de sedimentos es alta (0.02 a 0.07 l/hr) en relación al agua sin mezcla de sedimentos (0.001 a 0.02 l/hr).

A.7 Estudio sobre disminución de intensidad luminosa en el agua

La velocidad de producción en el lago es influenciada por la amplitud de la zona eufótica y por la distribución vertical de la luz.

Se utilizaron fotómetros sumergibles en el estudio sobre disminución de la intensidad luminosa en el agua, y los resultados obtenidos se presentan en la Fig. S7.A.5.

TABLAS

Table S7.1.1 Numerical Value Model Objectives and Content

Objectives	Description
Analysis of Degree of Contribution to Present Pollution	<ul style="list-style-type: none"> • Water balance and rotation • Inflow pollutant load by river • Transmission phenomenon of lake water quality • Lake water quality by contributors • Estimation of seasonal change characteristics
Predictions of Future Lake Water Quality	<ul style="list-style-type: none"> • Long term estimation of present condition
Test Calculation of Effects of Implementation of Water Quality Improvement Measures	<ul style="list-style-type: none"> • Effects of each water quality improvement measure

Table S7.2-1 Classification of Lake Water Quality Prediction Model

Model Name	Description	Objective Phenomena for Analysis	Seasonal Fluctuation Reappearances
Vollenweider Model	Based on a black box statistical analysis of the lake ecosystem water quality fluctuations	Eutrophication	No
Ecosystem Model	Analysis of the lake water quality fluctuation within the ecosystem	Eutrophication	Yes
Matter Circulation Model	Analysis of the lake water quality fluctuation focussing on water balance and matter circulation	Eutrophication and other causes	Yes

Table S7.2.2 Constitution of Water Pollutant Matters of Lake Ypacarai

Pollutant Matters	Participating Matters	Calculation Index	Remarks
Remaining Matters from Inflow Load	-	COD	There is thought to be an abundance of humic acid of varying forms and organic matters which do not decompose easily
Internally produced algae and their remains	Nitrogen Phosphorous	Chl-a	As an eutrophic lake, there is abundant phytoplankton and its remains
Matter in stirred-up sludge	Sludge	COD SS	Inorganic (clay and silt) and organic matters within sludge are stirred up and float

(Note 1) Data for investigation of disease-related bacteria by numerical model are inexistent.

(Note 2) Iron and Mn caused colors could be considered, but this phenomenon is not clearly understood.

Table S7.3.1 Weighted Coefficient by Thiessen Method

Observation point	PARAGUARI	PIRAYU	YPACARAI	SAN BERNARDINO	AREGUA	SAN LORENZO
Basin block						
I PIRAYU	0.23	0.55	0.22	0	0	0
II EAST	0	0	0.23	0.77	0	0
III WEST	0	0	0.43	0.08	0.49	0
IV YUQUVRY	0	0	0.18	0	0.40	0.42
V LAKE	0	0	0.03	0.56	0.41	0

Table S7.3.2 Coefficient for Seasonal Variation of Standard Specific Discharge

	1988			1989							
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1
I PIRAYU	1	2.5	2.0	1.4	0.81	0.69	0.69	0.75	0.94	0.94	0.81
II EAST	1	2.2	1.5	1.4	1.1	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.8
III WEST	1	2.2	1.5	1.4	1.1	0.8	0.7	0.7	0.9	0.9	0.8
IV YUQUVRY	1	1.9	1.7	1.4	1.2	0.96	0.75	0.71	0.92	0.92	0.83

Based on the monthly flow observation results from the Pirayu and Yuquvry Basins. As for the remaining East and West Coast, based on on-site investigations, summarized values have been input.

Table S7.3-3 Constants Related to Flow Amount

Ratio of Rainfall		PIRAYU	EAST	WEST	YUQUVRY
Rate of Storm Water Discharge	K2	0.10	0.15	0.15	0.10
Artificial Discharge	Qb	3300	1570	2130	26500
Runoff Rate of Artificial Discharge	K3	0.40	0.40	0.40	0.40
Ineffective Precipitation	(mm/day)	5	5	5	5
Standard specific Discharge	(m ³ /s/km ²)	0.0048	0.0053	0.0066	0.0084

Note : Established from the data on the flow amount survey at inflow rivers during flooding and calm water times, which was verified by trial calculation.

(4) Constants Related to Load Amount

Table S7.3-4 Inflow rate of discharged load from point sources in fine weather

KIE	COB	IN	TP
DOMESTIC	0.127	0.021	0.029
HOTEL & CLUB	0.8	0.6	0.6
PUBLIC	0.4	0.3	0.5
INDUSTRY	0.4	0.3	0.7

Note: Domestic figures are data obtained from actual survey (pollution source survey).

Values for the other categories were obtained by trial calculations on the basis of estimated discharge.

Table S7.3-5 Inflow rate of Discharged Load from Non-Point Sources in
Fine Weather

KID	COD	TN	TP	SS
Non-point	0.02	0.11	0.30	0.06

Note: Established while investigating water quality
of inflowing rivers during fine weather

Table S7.3.6 Rate of Decomposition

and Loss of Remnant Load

KI	COD	TN	TP	SS
	0.06	0.02	0.00	0.00

Note: Based on characteristics of Water Quality Index

Table S7.3-7 Annual Inflow Water 1988.3 - 1989.2

Item	Basin Block	PIRAYU	EAST	WEST	YUQUVRY	TOTAL
Rainfall (mm)		1485	1484	1522	1448	1485
Basin area (km ²)		351.9	75.2	60.2	328.2	815.5
Flow amount ($\times 10^6 \text{ m}^3$)		136	25	21	149	331
Discharge coefficient		0.36	0.24	0.24	0.31	0.27

Note: The lake rainfall over the lake from March 1, 1988 to Feb. 28, 1989 was 1479mm

Table S7.3-8 Annual Inflow Load

	PIRAYU	EAST	WEST	YUQUVRY	TOTAL
COD ($\times 10^3 \text{ kg}$)	2682 (586/2016)	994 (212/782)	1034 (228/806)	5182 (2681/2501)	9812 (37071/6105)
TK ($\times 10^3 \text{ kg}$)	107 (50/57)	44 (18/26)	43 (14/29)	180 (101/79)	374 (183/191)
TP ($\times 10^3 \text{ kg}$)	19.3 (10.2/8.2)	9.3 (2.2/7.1)	10.9 (2.8/8.1)	54.9 (40.6/14.3)	94.4 (55.8/38.6)
SS ($\times 10^3 \text{ kg}$)	2262 (2262/4602)	2747 (426/2321)	2793 (429/2364)	7955 (3398/4557)	20359 (6515/13844)

Note: (L1/L2) L1 Calm water inflow load

L2 Flood time inflow load

Table S7.A.1 Phenomena related to Lake Water Quality Variation

Item	Content	Existence of on-site tests, survey data
Marsh Purification and Settlement	A portion of the inflow load biologically purified in the marsh. Furthermore, a portion of the particle load settles.	Partially existent (site water quality survey)
Sludge Elution	Classified by influence of wind. settled elution Floating elution	Existence of data on settled elution
Sludge Stirring up	Increase in SS brought on by the sludge stirring-up by the wind, and the shift to dissolution	Partially existent Inexistence of data or speed of shift to dissolution
Settlement	Lake particle matter (clay colloid, Algae) settles as time goes on.	Existence of data on <ul style="list-style-type: none"> · particle distribution · settlement survey · testing of settlement by measuring cylinder
Production	Phytoplankton grows by collecting CO ₂ in the water and the nutrient salts (N, P) and illumination energy.	Existence of data on <ul style="list-style-type: none"> · AGP testing · illumination decrease survey
Decomposition	Dead phytoplankton becomes inorganic matter by decomposition by micro-organisms	None

Table S7.A-2 Inflow River Low Marsh Summary

Classification	Area	Low Marsh Capacity (km)	Calm Water Load (10 ⁹ m)	Average flow amount m ³ /m ² /d
Yuquyra River	15.7	7.85	0.02	3.65 m ³ /S
Pirayu River	1.85	1.46	0.08	1.55 m ³ /S

Table S7.A-3 Ellution Rate of Lake Bottom Material

Item	Ellution Rate (mg/nf · day)		Observation
	20 °C	30 °C	
D. COD	228	238	Aerobic Condition
IN	1.41	-	Aerobic Condition
D. PO. P	0.104	0.423	Aerobic Condition

Table S7.A.4 Sedimentation Materials (mg/m²/day)

Item \ Period	7/12	7/13	7/14	7/15	7/18	7/19	7/20	Min-MAX
	~ 7/13	~ 7/14	~ 7/15	~ 7/18	~ 7/19	~ 7/20	~ 7/21	AVE
SS	3237	3434	8850	2421	2156	2194	2119	(2119 ~ 8850) 3487
P-COD	1804	1280	1211	665	363	2018	1695	(363 ~ 2018) 1291
P-ON	16.2	10.8	54.0	14.9	6.8	45.7	10.1	(6.8 ~ 54.0) 22.6
PTP	6.0	2.5	4.3	1.9	3.5	4.1	4.1	(1.9 ~ 6.0) 3.8

Table S7.A-5 Settlement Velocity Calculation Results (SS)

Item \ Survey Period	7/12	7/13	7/14	7/15	7/18	7/19	7/20	Min	Ave
	~ 7/13	~ 7/14	~ 7/15	~ 7/18	~ 7/19	~ 7/20	~ 7/21	~ Max	
Lake SS (mg/)	8.2	10.5	10.5	10.5	14.2	12.5	7.0	-	-
Collector amount (mg/nf)	16400	21000	21000	21000	28400	25000	14000	-	-
Settlement amount (mg/nf/d)	3237	3434	8850	2421	2156	2194	2119	-	-
Daily settlement rate (l/d)	0.197	0.164	0.421	0.115	0.076	0.088	0.151	0.076 0.421	0.173
Settlement relocity (m/d)	0.39	0.33	0.84	0.23	0.15	0.15	0.30	0.15 0.84	0.35

Table S7.A.6 Settlement Velocity Results

Settlement velocity(m/d)	Survey Period	7/12	7/13	7/14	7/15	7/18	7/19	7/20	Min MAX (AVE)
		7/13	7/14	7/15	7/18	7/19	7/20	7/21	
P.COD		0.24	0.17	0.16	0.09	0.05	0.27	0.23	0.05~ 0.27 (0.17)
P.ON		0.044	0.030	0.146	0.040	0.018	0.124	0.028	0.018 ~0.146 (0.061)
P.TP		0.158	0.066	0.114	0.050	0.092	0.108	0.108	0.50 ~0.158 (0.099)

FIGURAS

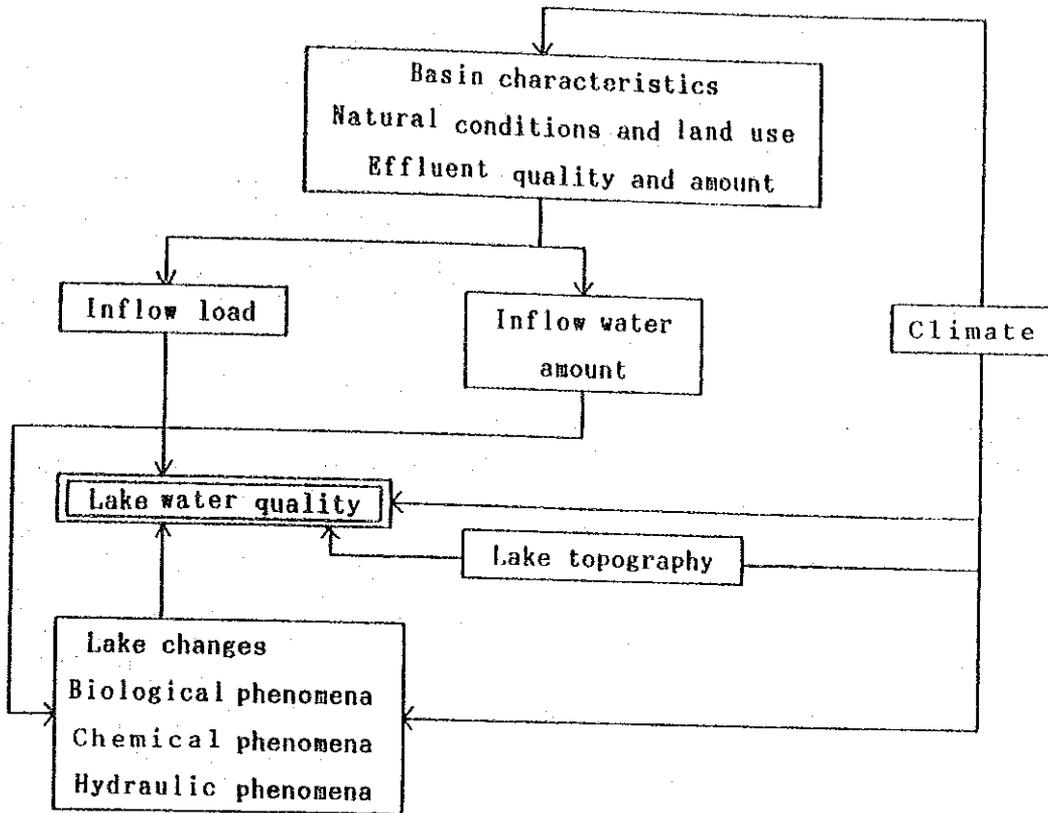


Fig. S7.1.1 Flow Chart on Lake Water Pollution Elements

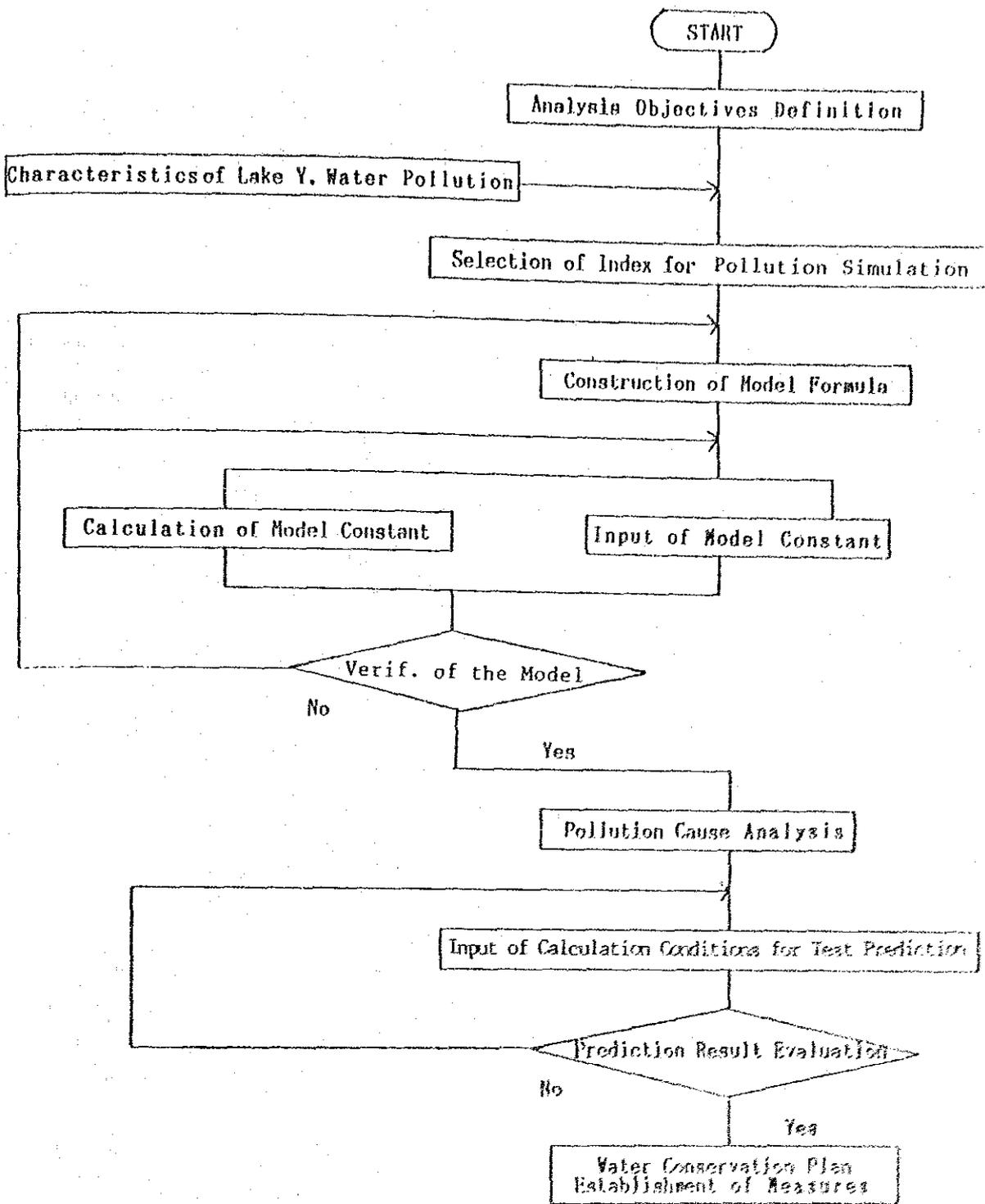


Fig. S7.1.2 Process of Analysis by Numerical Models

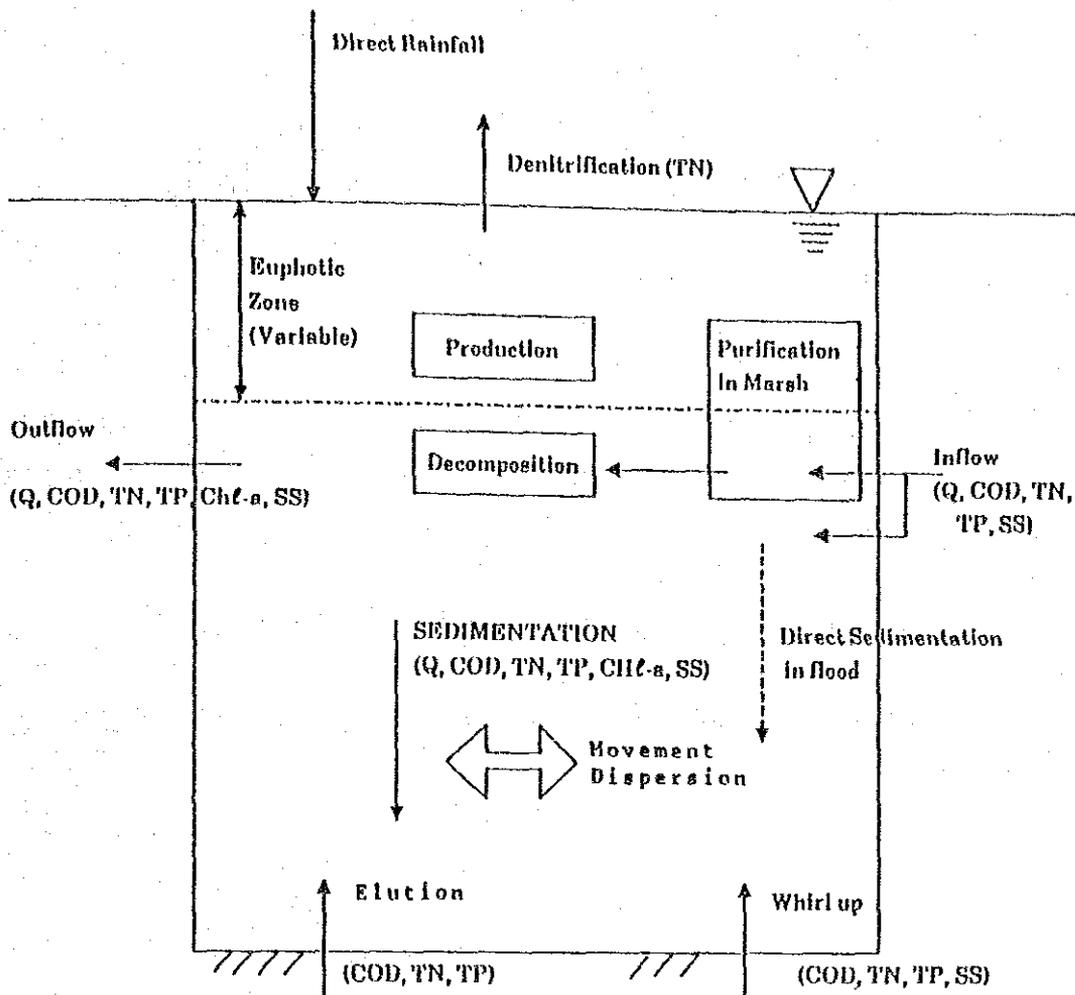


Fig. S7.2.1 Water Pollution in Lake Ypacareí

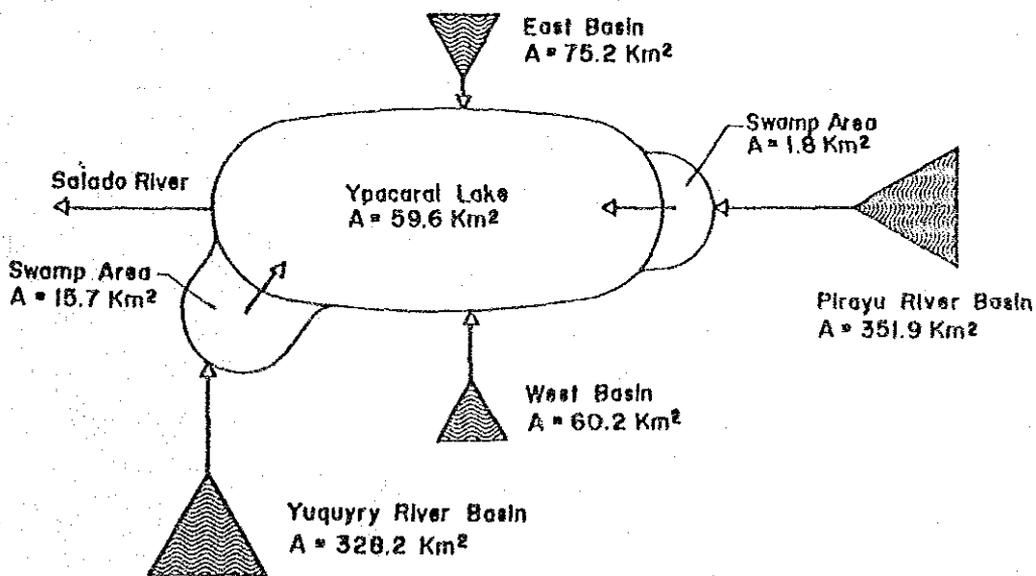


Fig. S7.2.2 Drainage System of the Lake Ypacareí

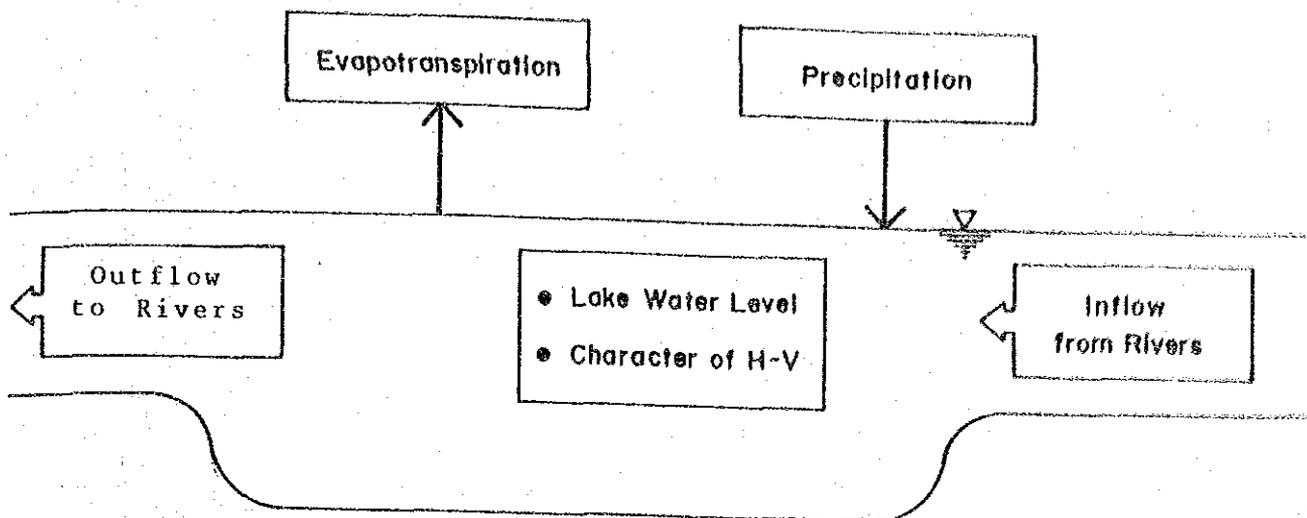


Fig. S7.2.3 Structure of Water Balance in the Lake Ypacarai

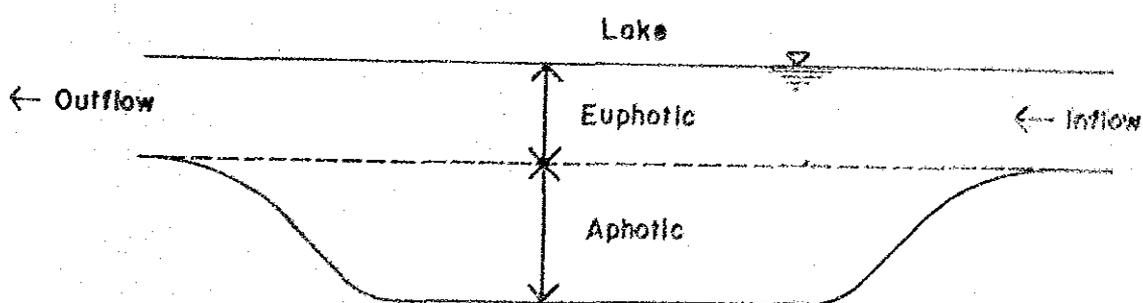


Fig. S7.2.4 Structure of Water Quality in the Lake Ypacarai

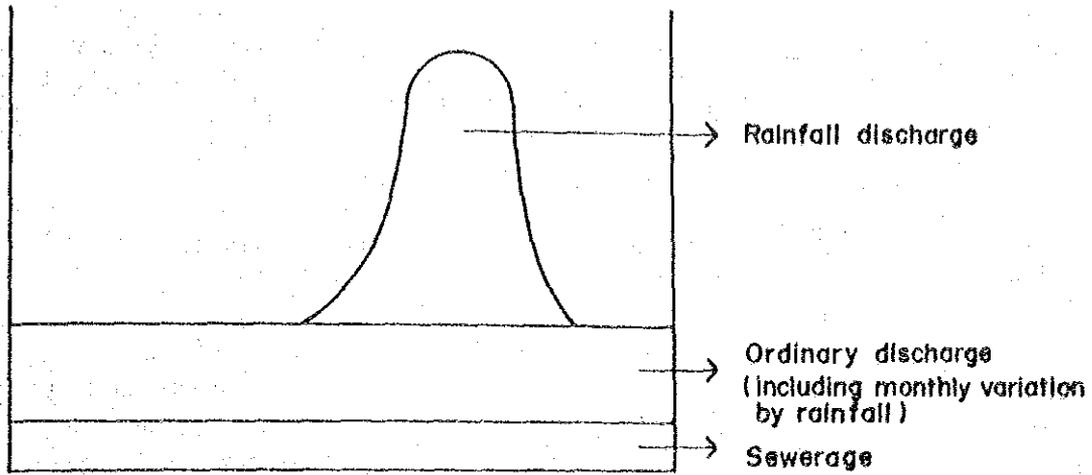


Fig.S7.3.1 Classification of run-off water

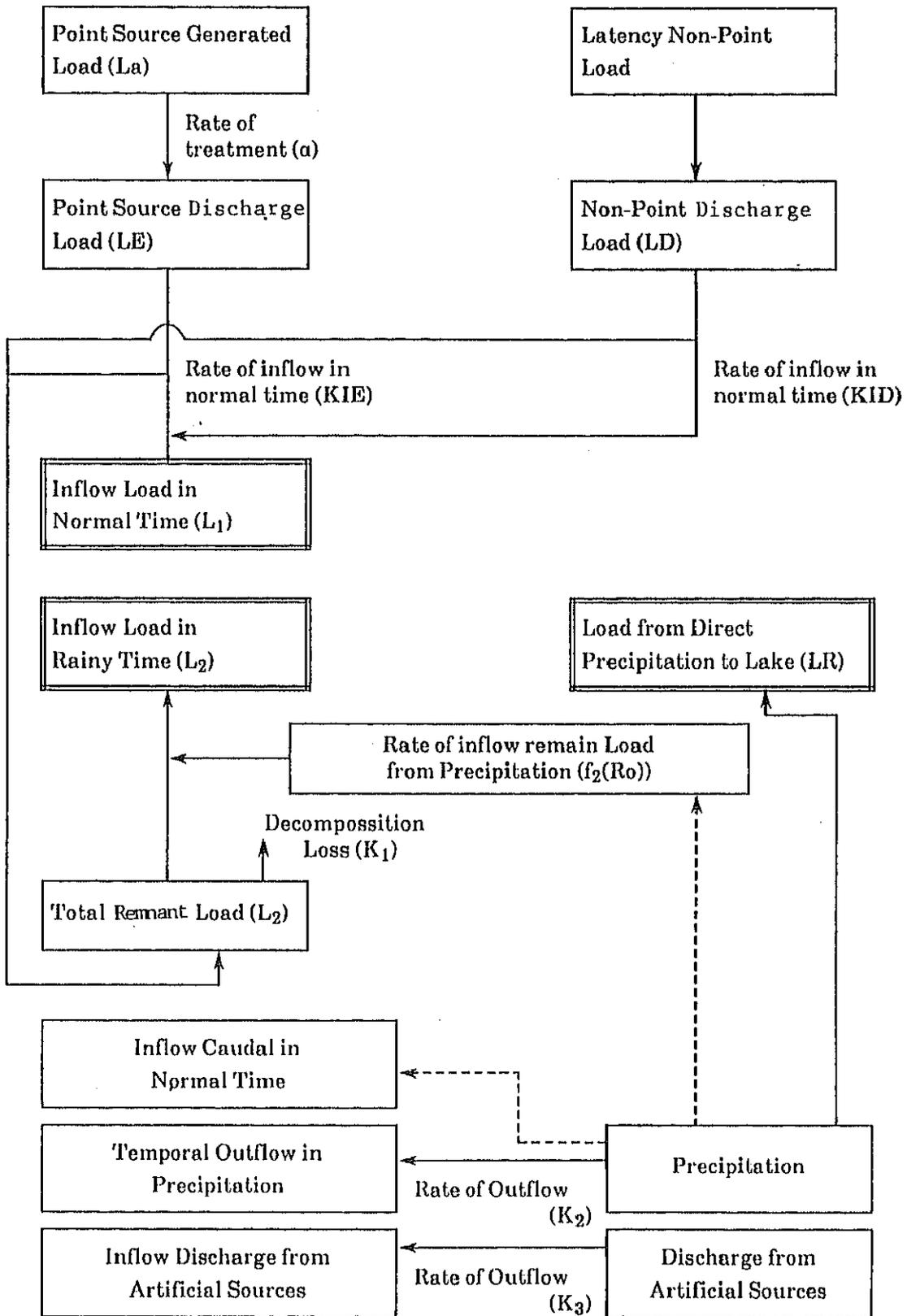


Fig S7.3.2 Inflow Contamination Load Model

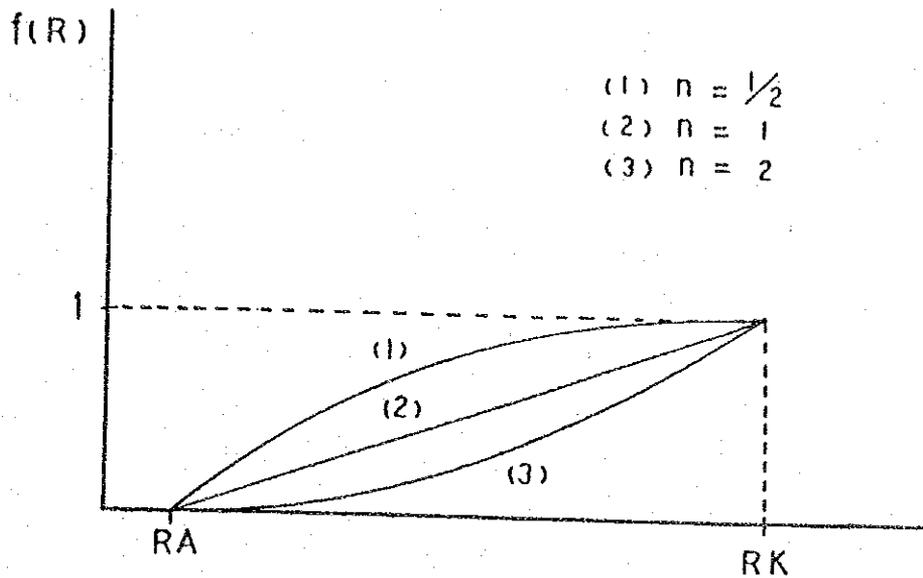


Fig. S7.3.3 Functions for Runoff of Storm Water

- $f(R)$: rate of discharge load outflow in relation to rainfall, having a 0 ~ 1 range
- RK : critical rainfall value at which all remnant load flows out, taken as 800 mm/day
- RA : threshold value of ineffective rainfall below which there is no load outflow, taken as 5 mm/day
- n : 1 for COD, TP, SS and 2 for TN, according to results of calculations made using data observed during flood

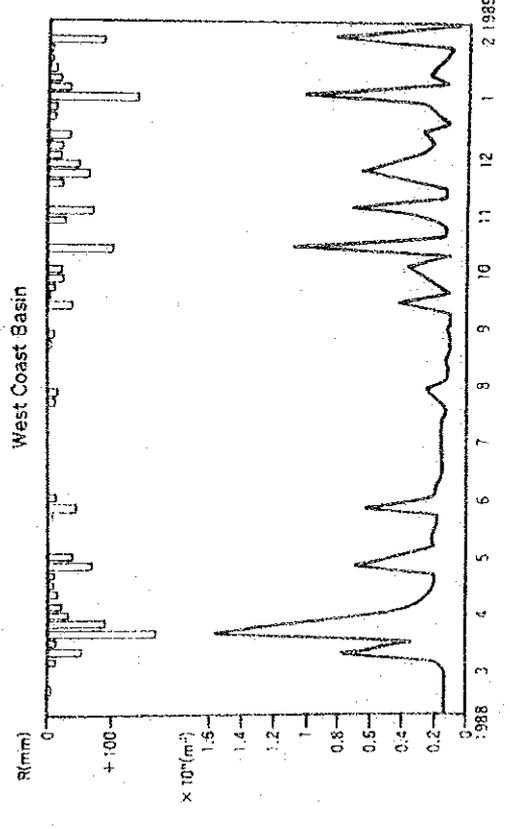
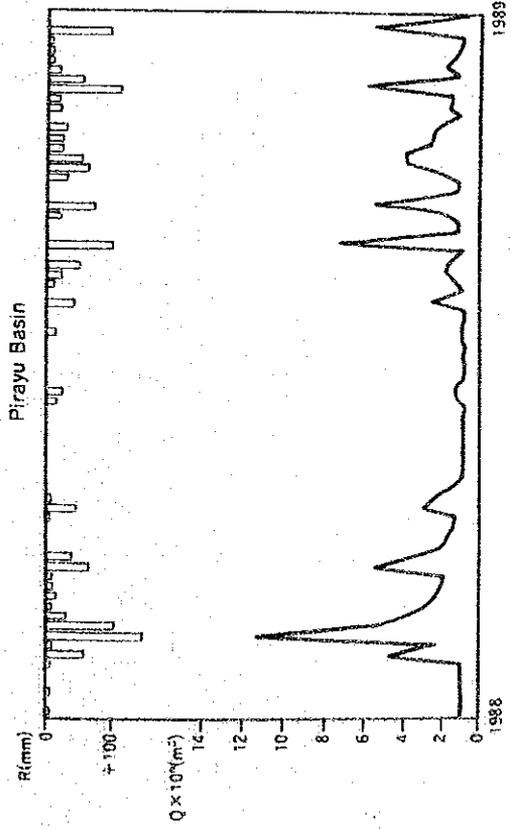
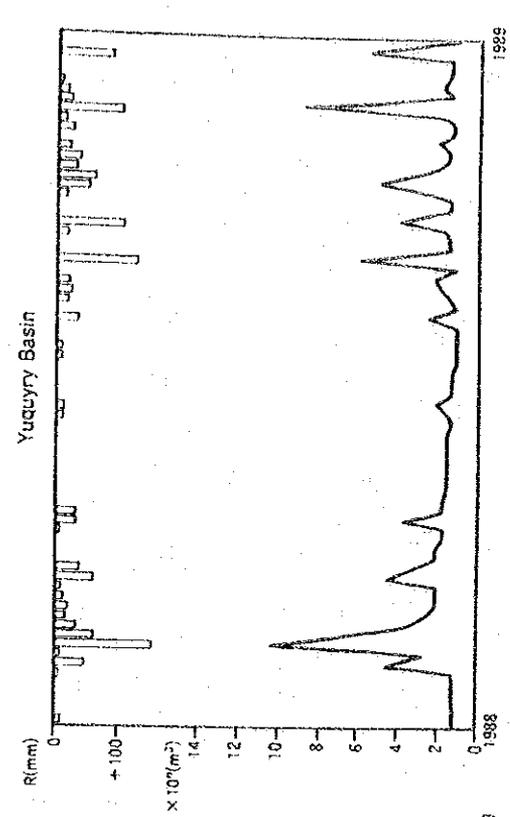
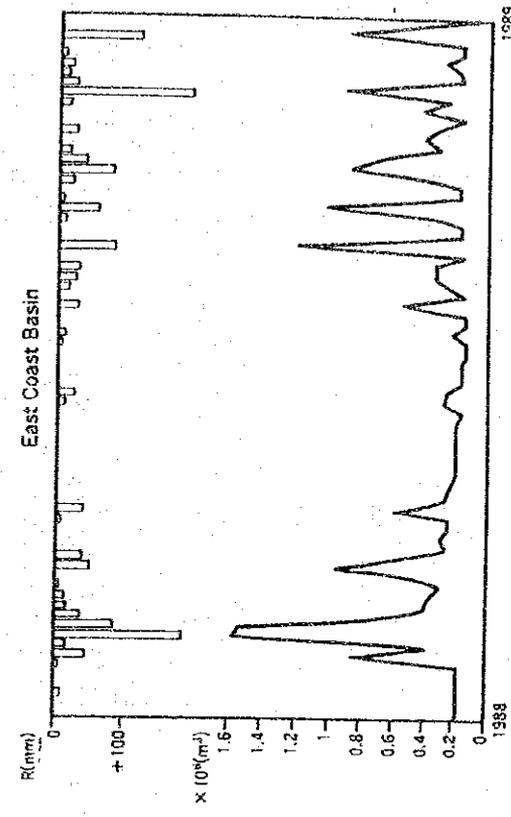


Fig. S7.3.4 Annual Quantity of Flow (in the Lake) from the Basins (1988. 3. 1. ~ 1989. 2. 28)

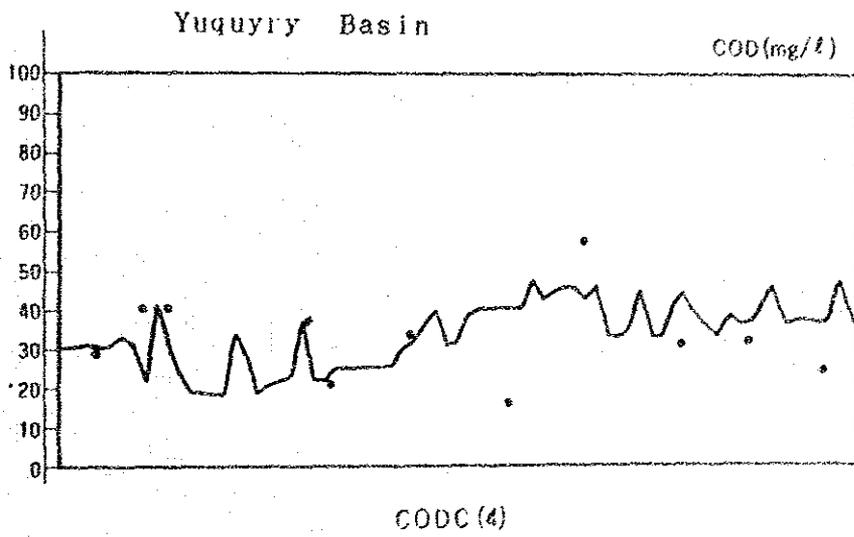
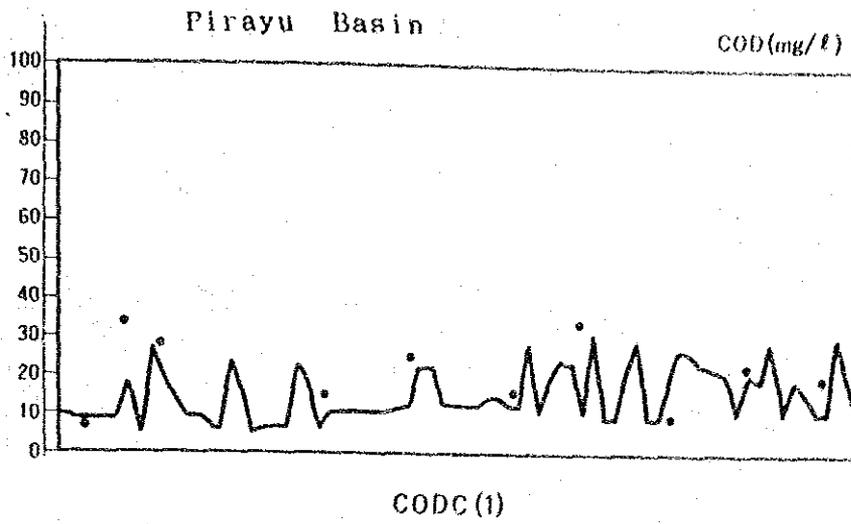


Fig.S7.3.5 Simulation results

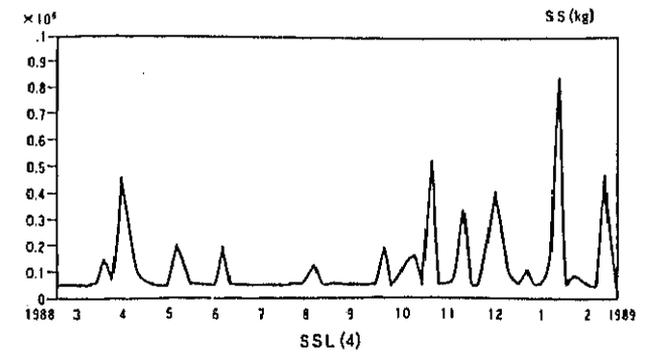
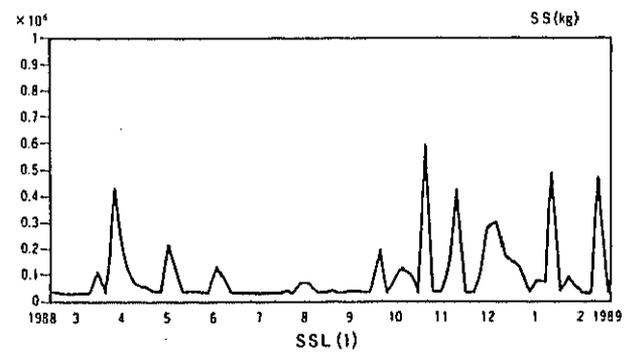
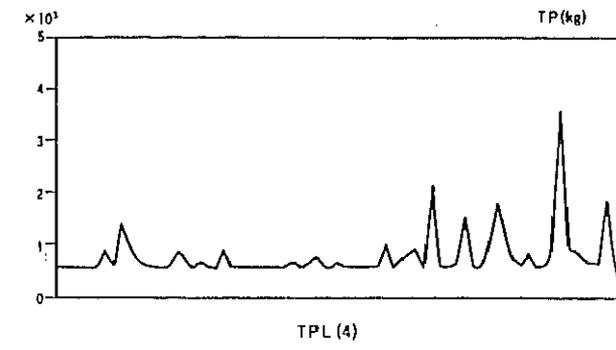
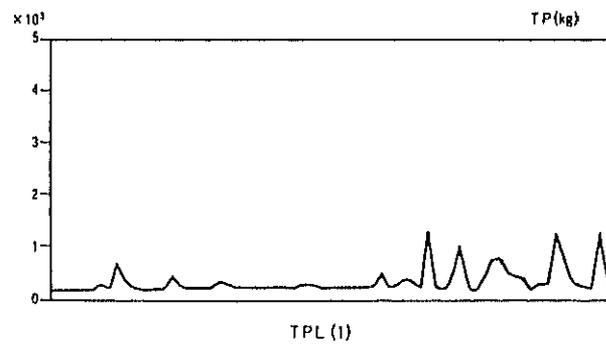
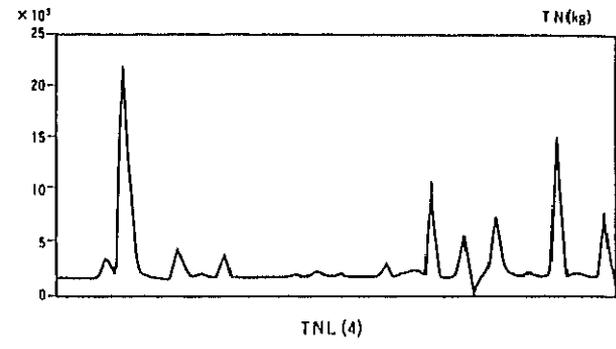
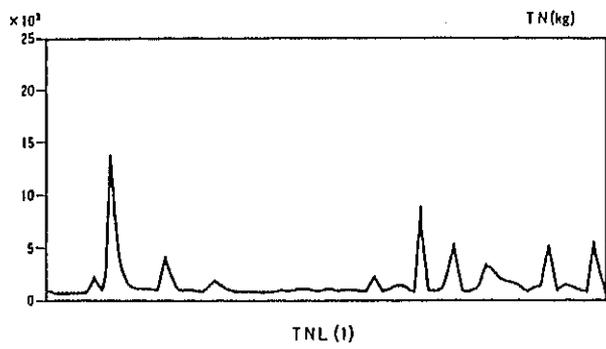
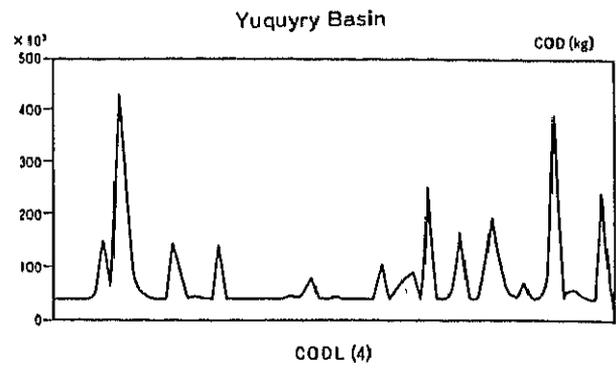
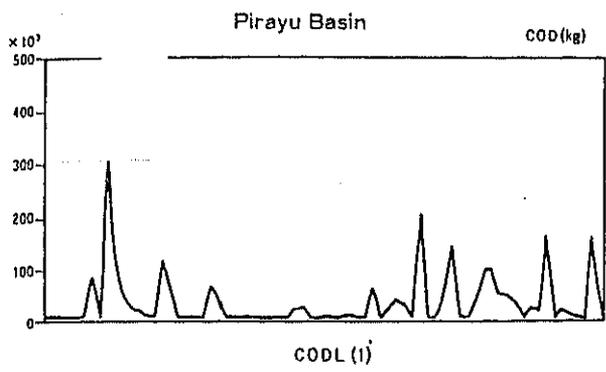


Fig.S7.3.6 Annual Water Quality & Load by Mathematical Simulation

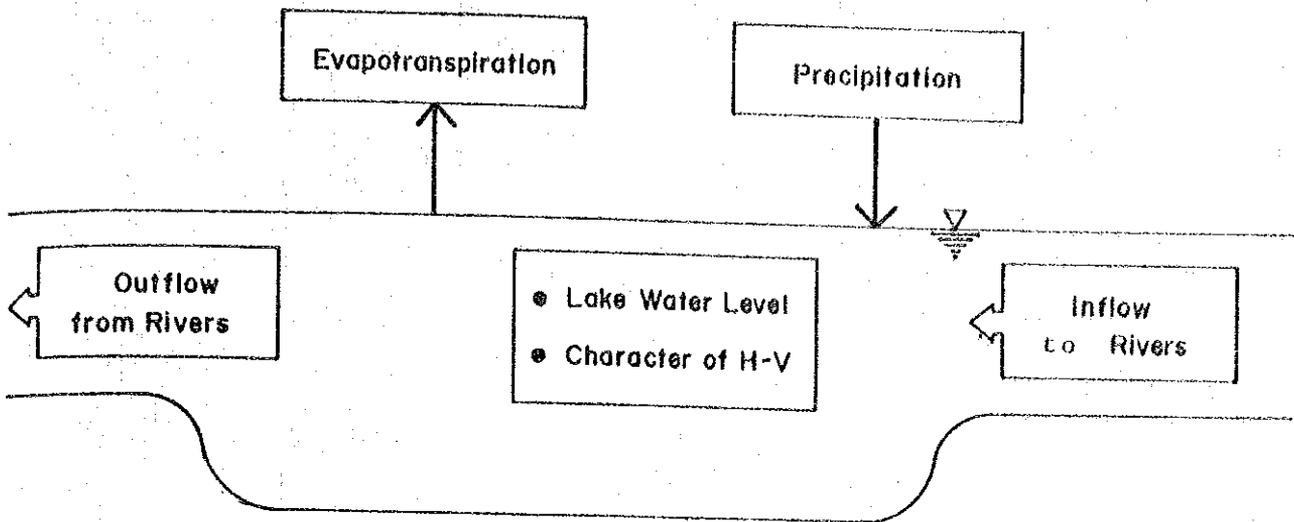


Fig. S7.4.1 Structure of Water Balance in the Lake Ypacarai

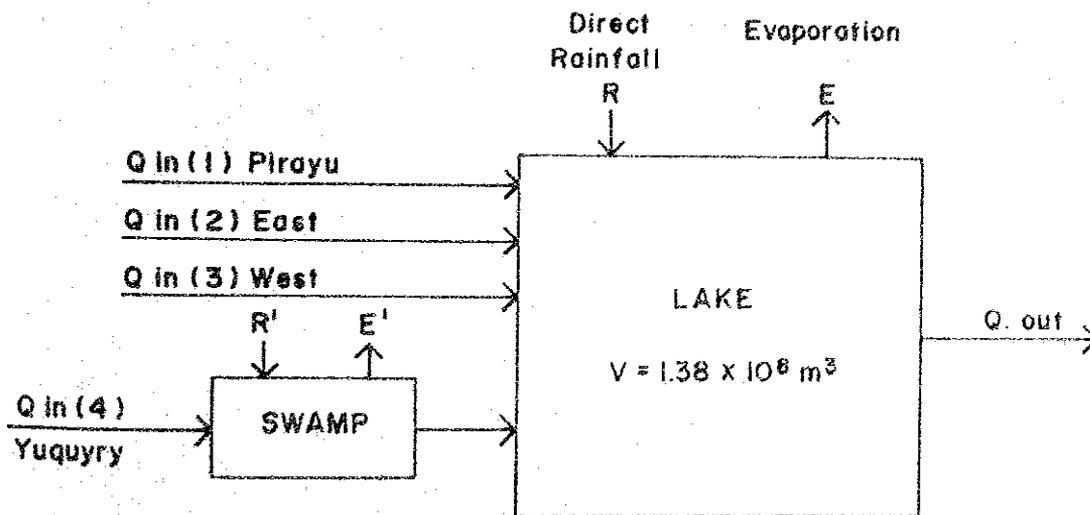


Fig. S7.4.2 Water Balance in the Ypacarai

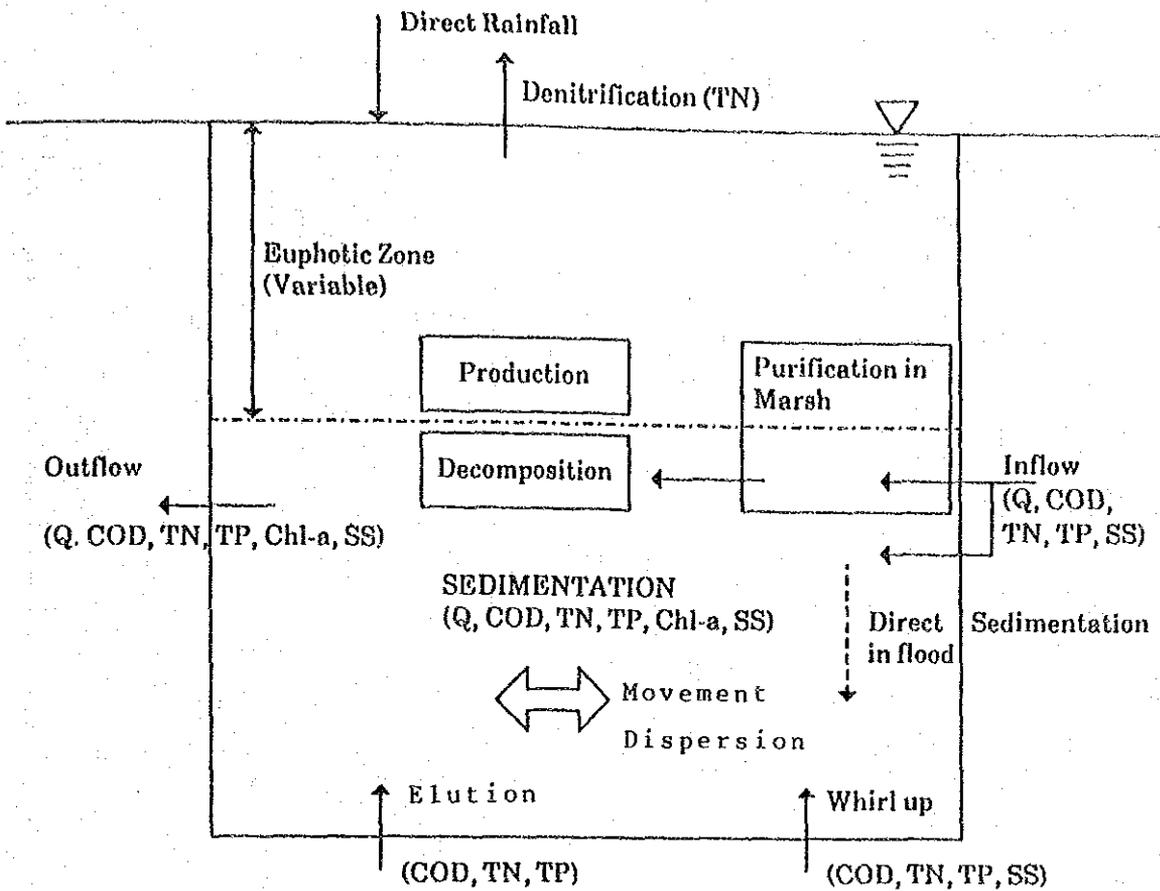


Fig.S7.4.3 Structure of Intra-Lake Matter Transformation Model

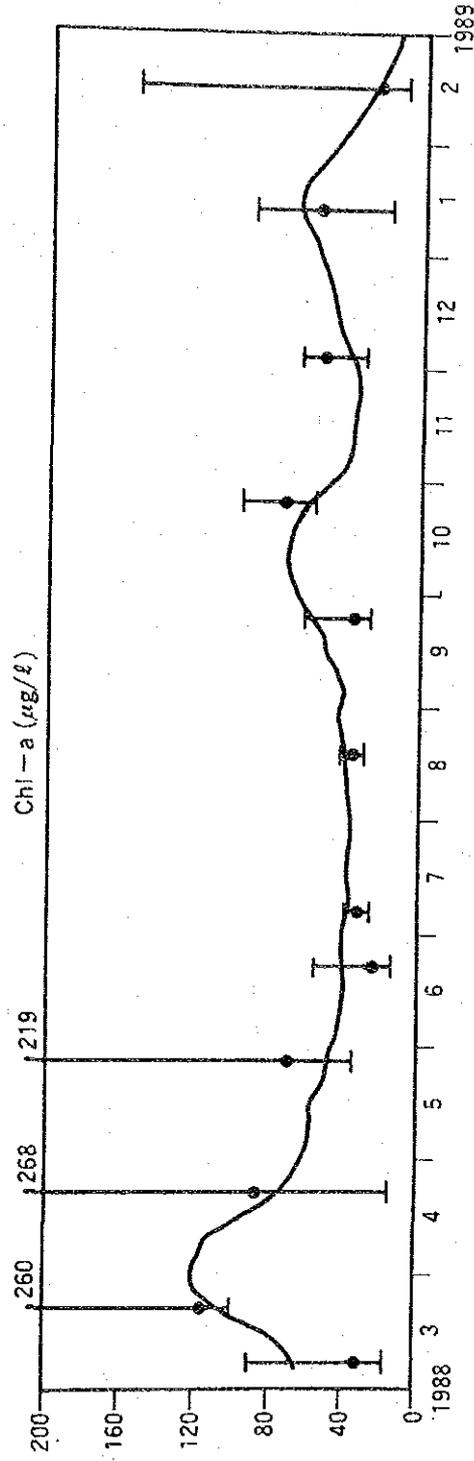
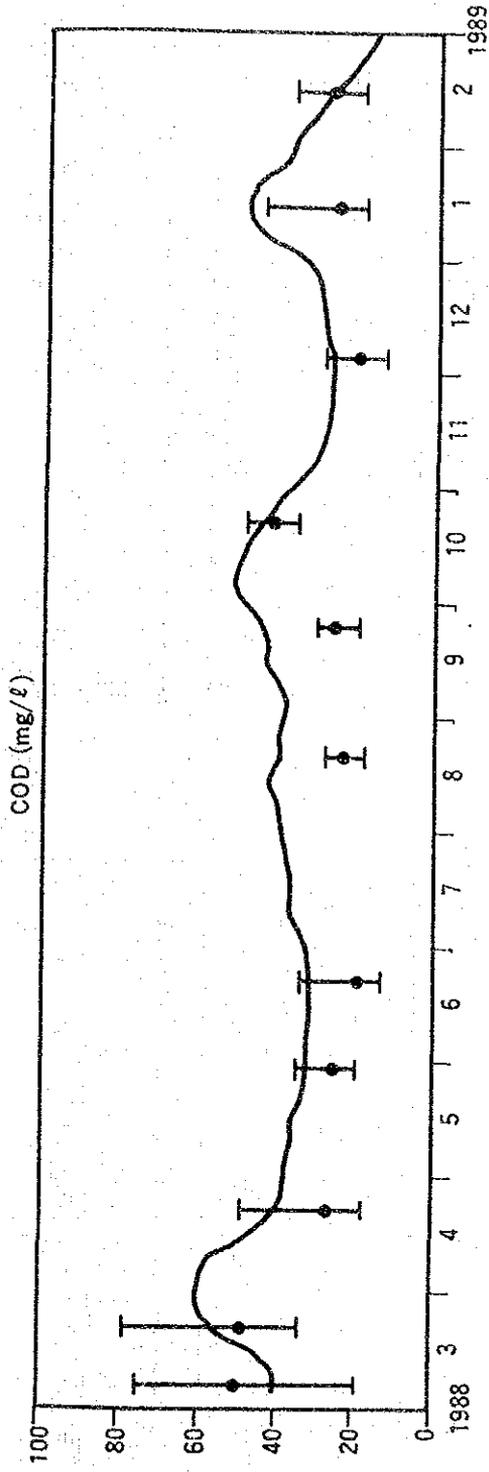


Fig.S7.4.4 Annual Variation by Simulation

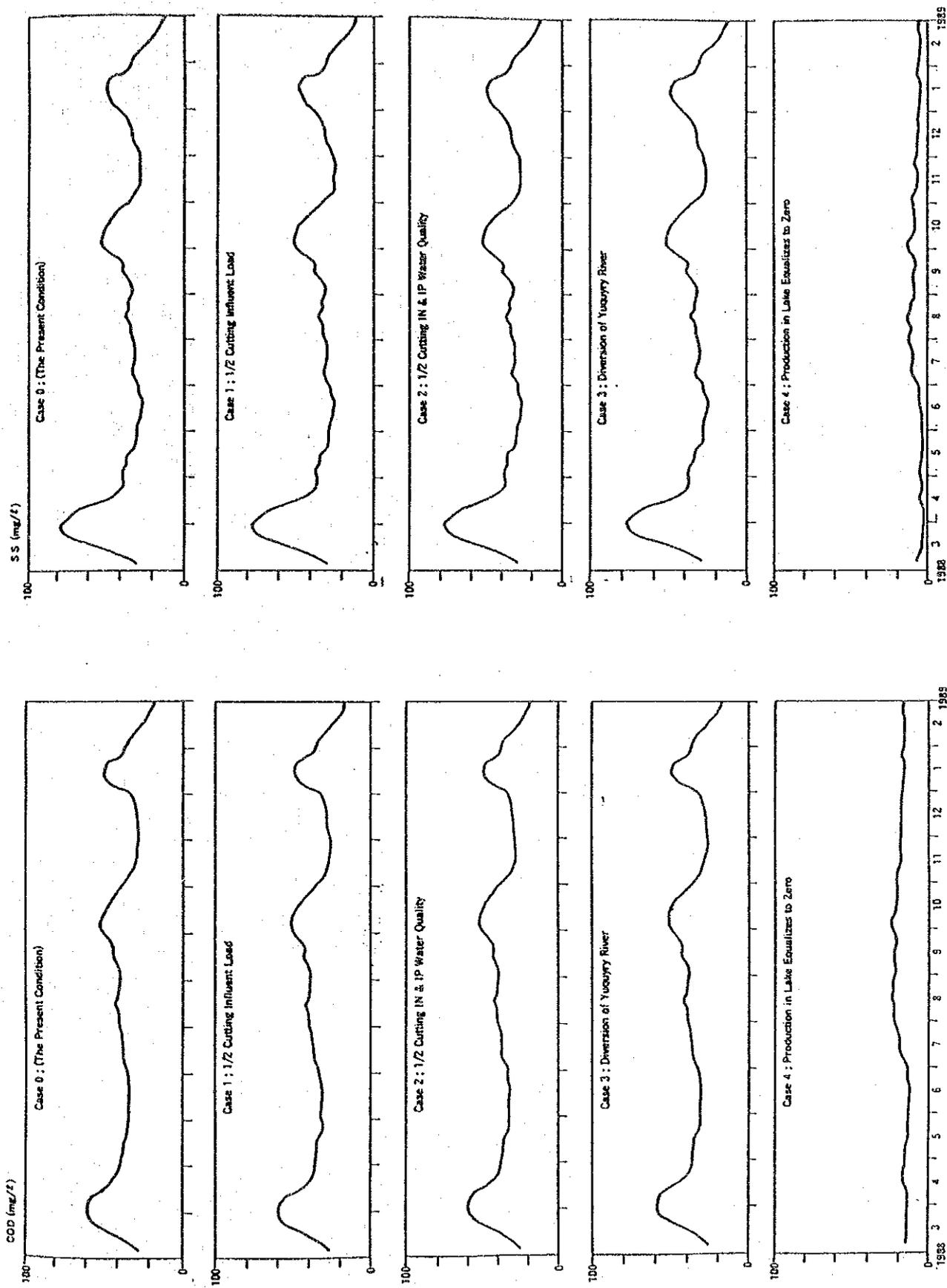
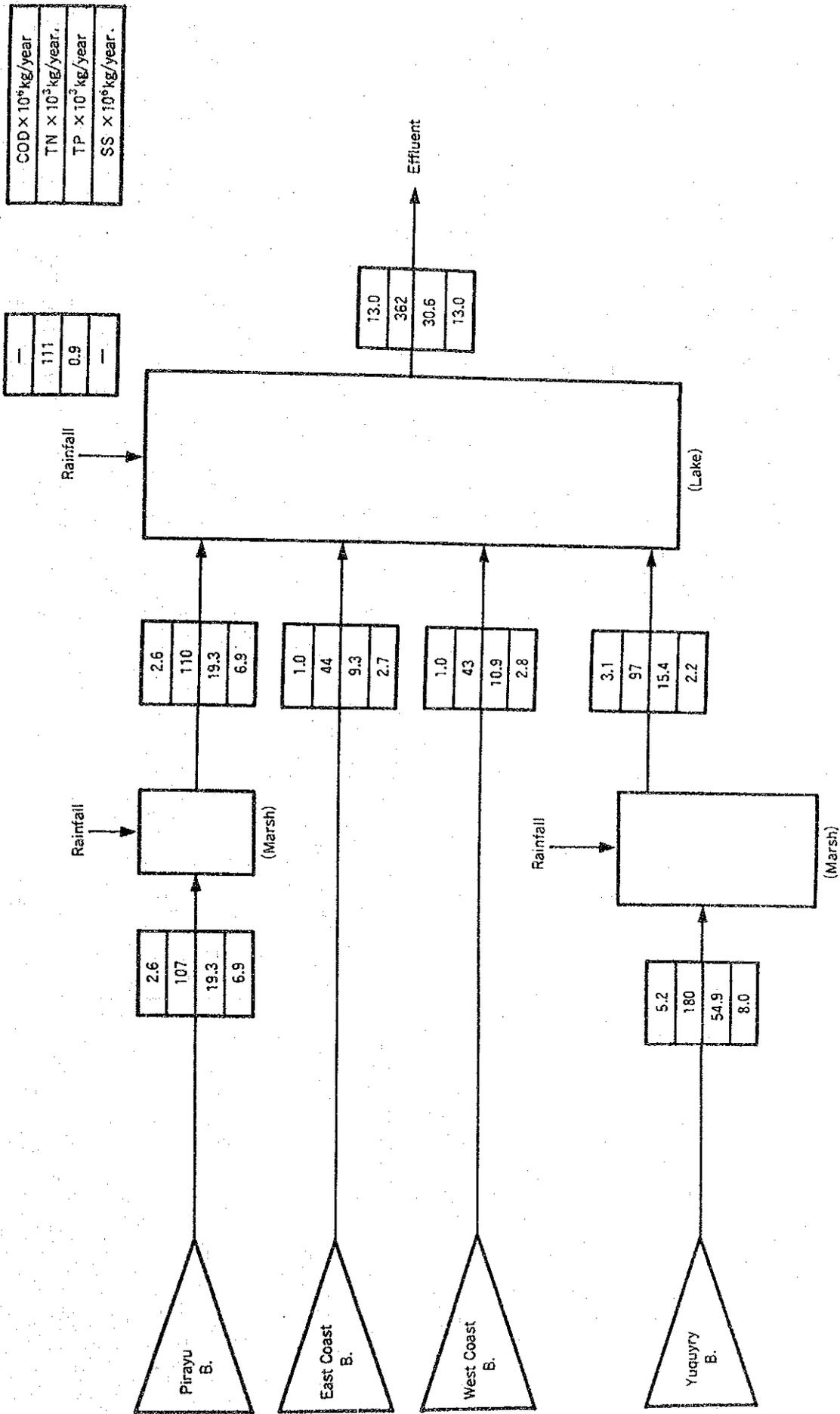


Fig.S7.5.1 Estimation of Lake Water Quality by Mathematical Simulation Method



(By Simulation)

Fig. S7.5.2 Annual Mass Balance of Pollutants (1988.3 ~ 1989.2)

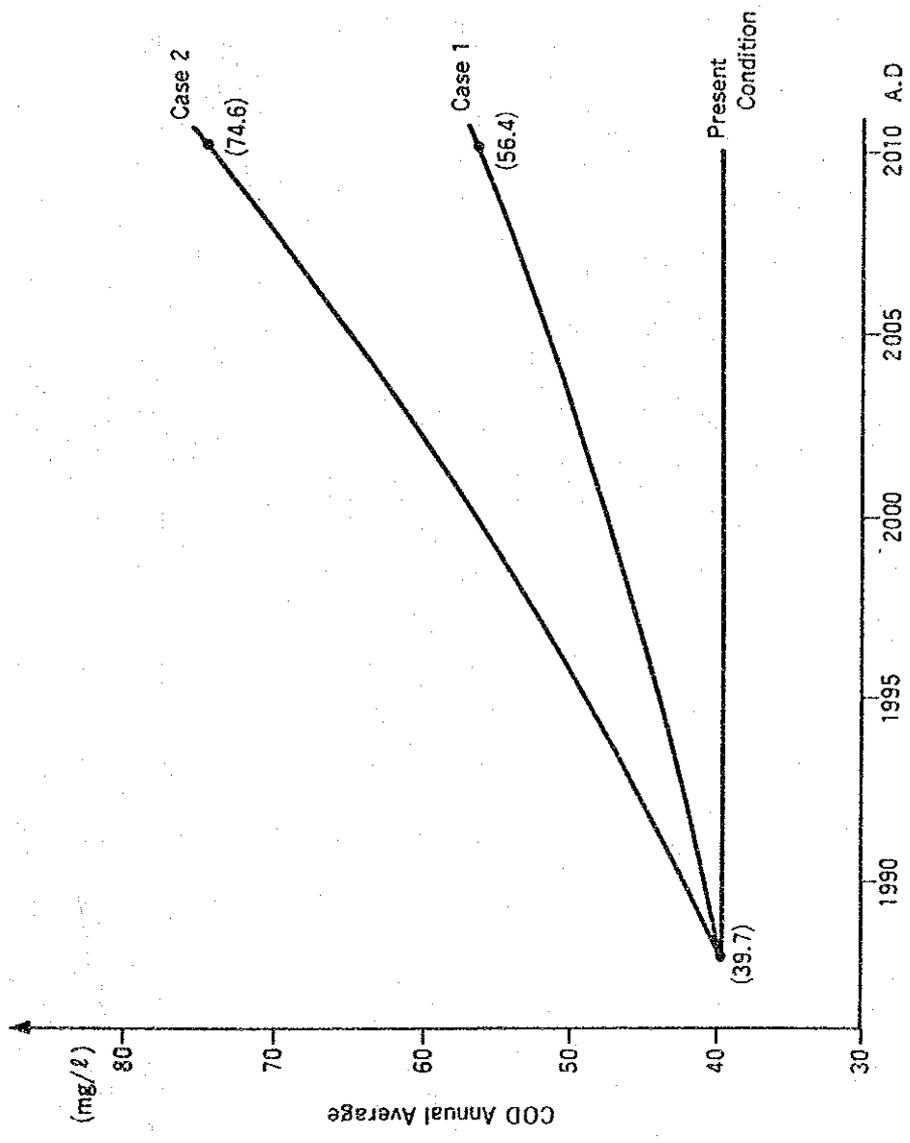


Fig. S7.5.3 Estimation of Variation of COD Annual Average

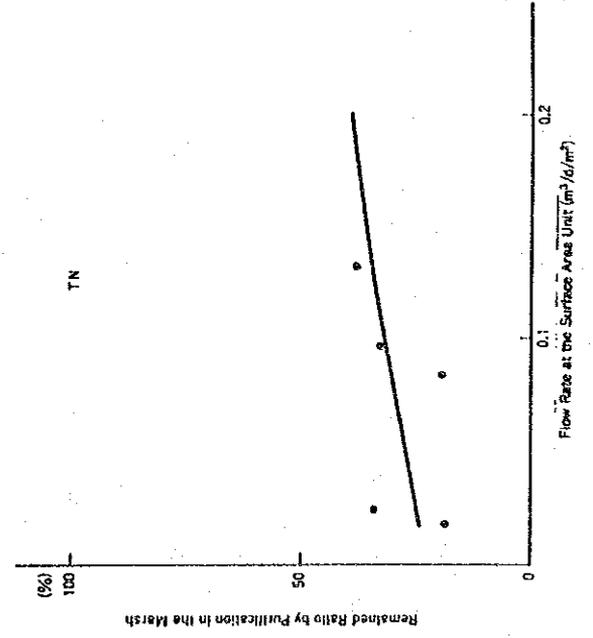
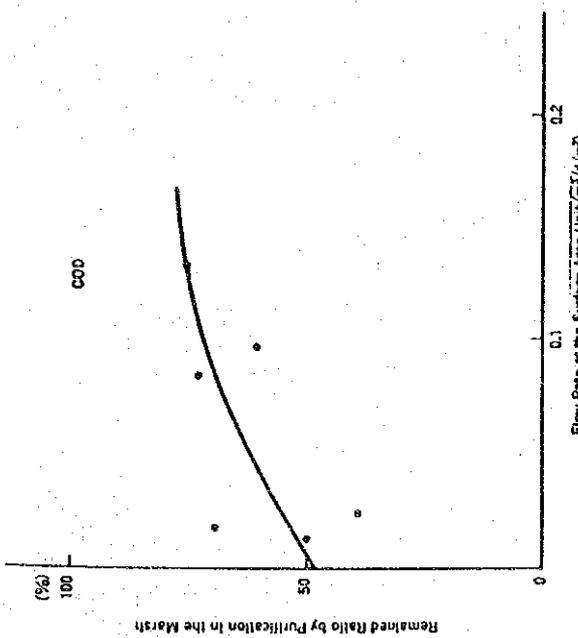
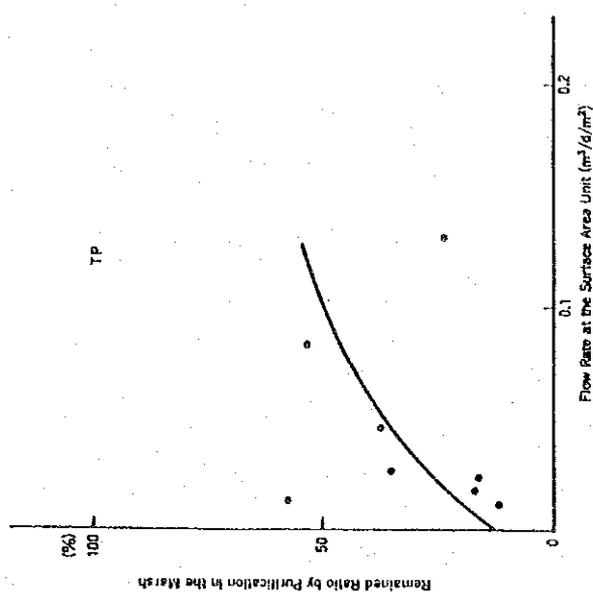
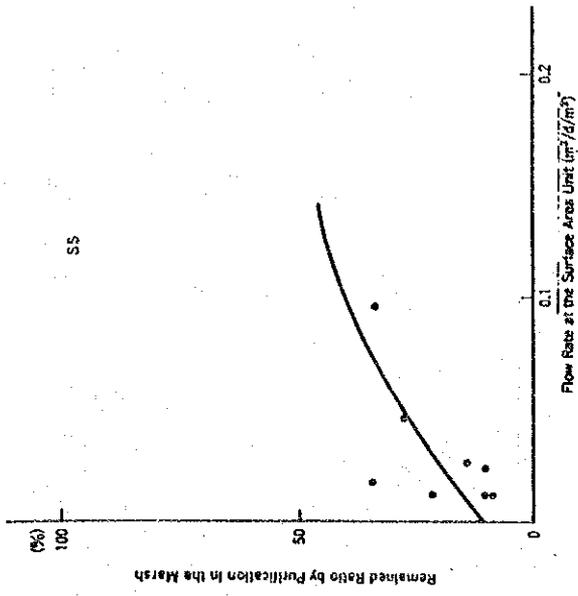


Fig.S7.A.1 Relationship between purification and water flow per unit area

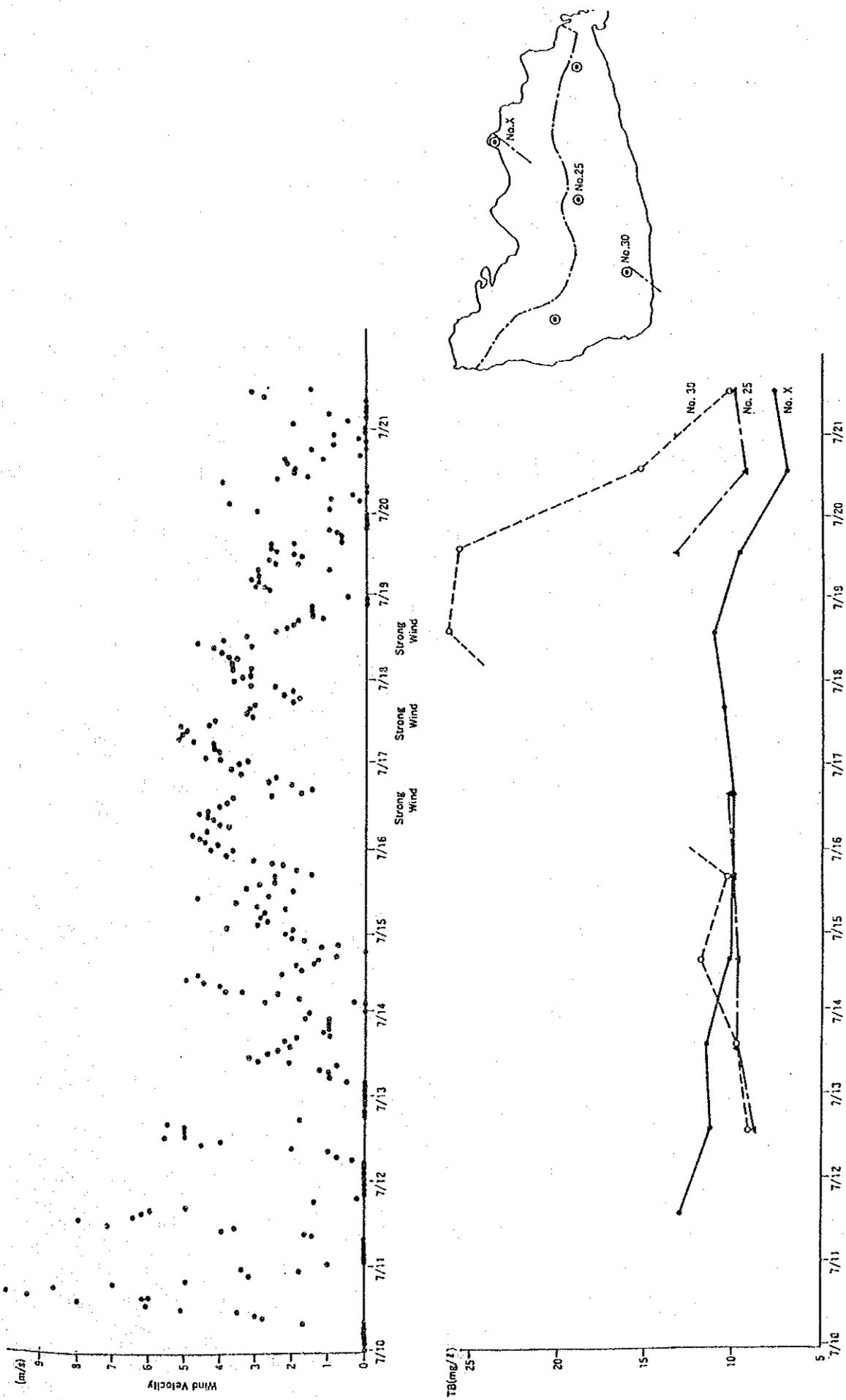


Fig.S7.A.2 Relationship between wind velocity and turbidity

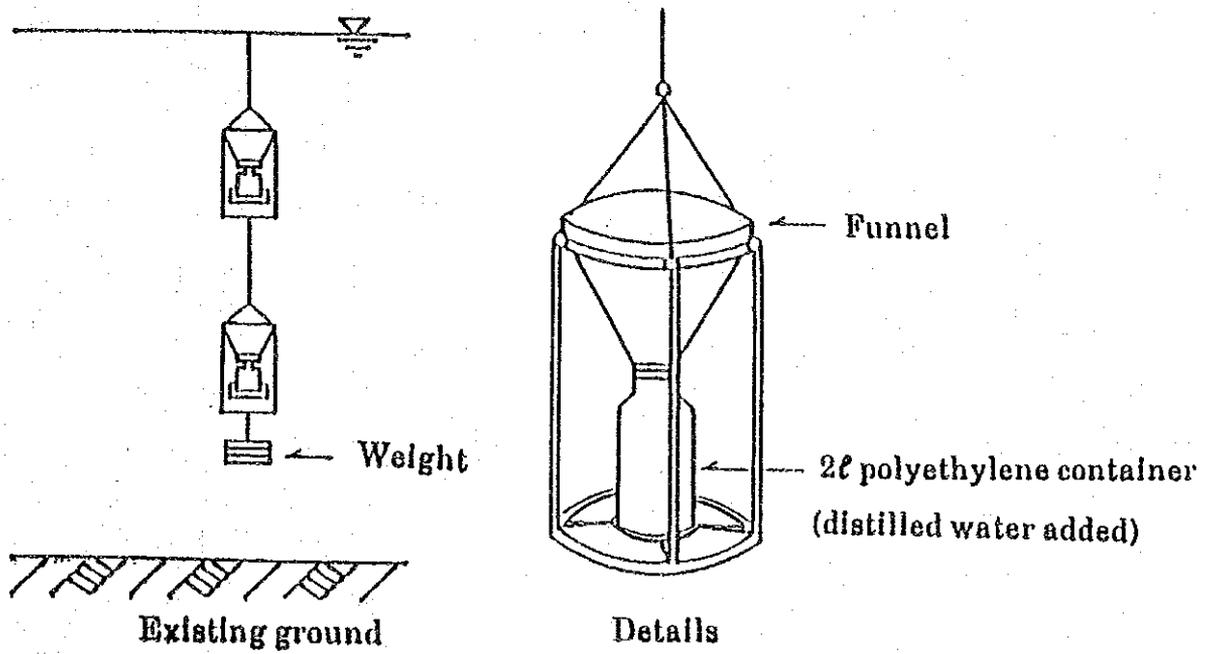


Fig.S7.A.3 Settlement Catcher Instrument and Installation

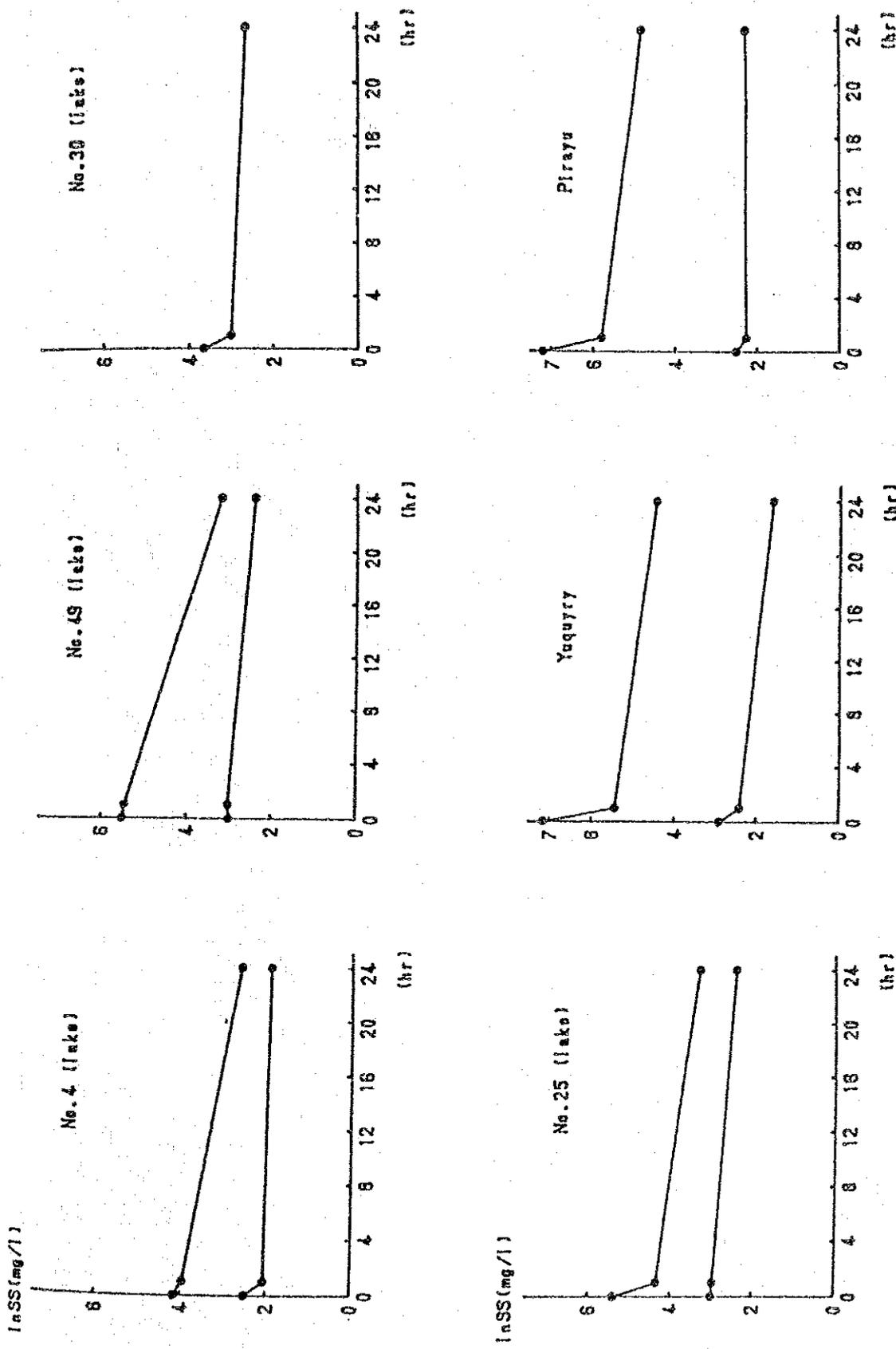


Fig.S7.A.4 Results of experiments on Sedimentation

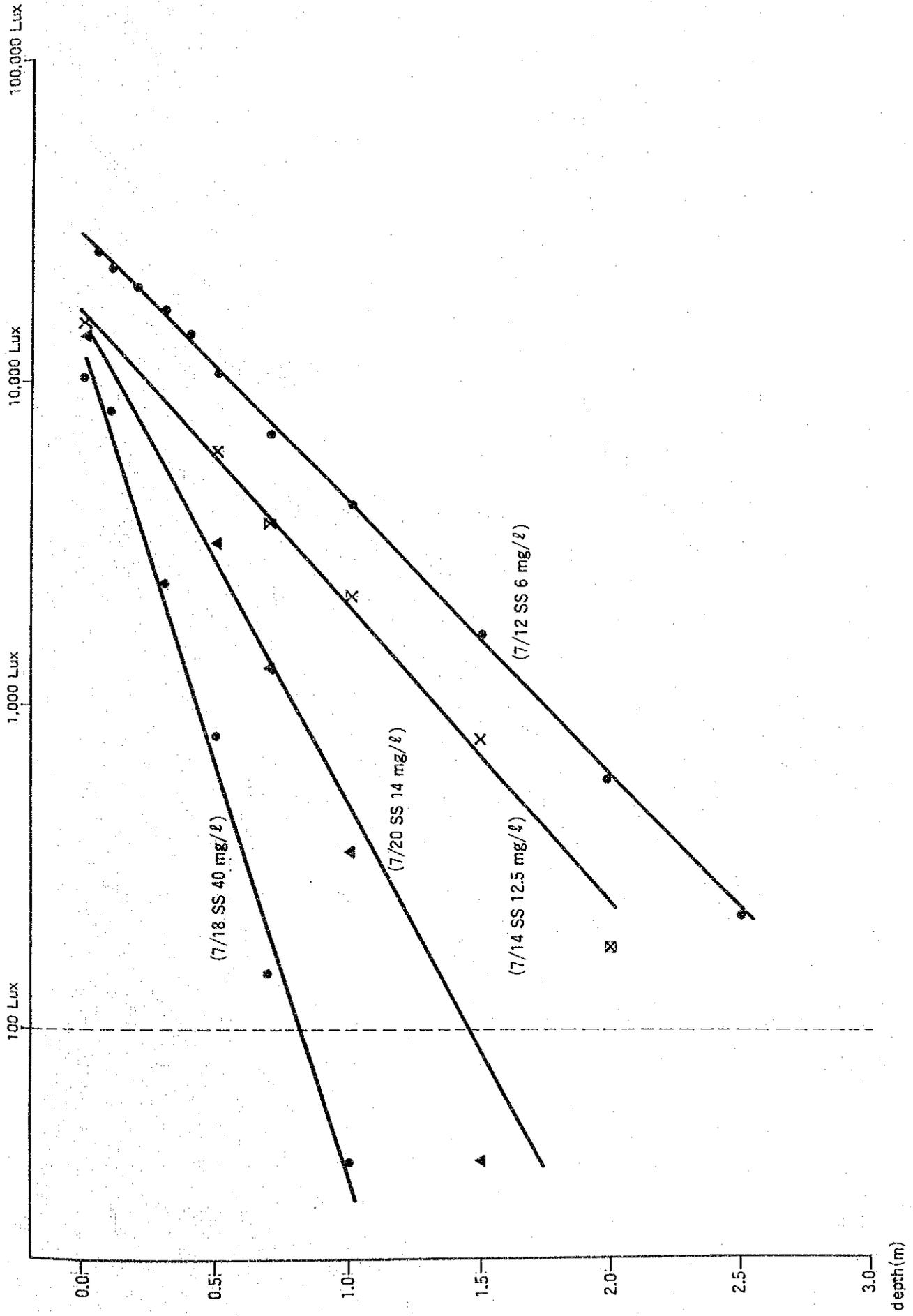


Fig. S7.A.5 Reduction of Illumination in Lake (Station No. 30)

