MODELO HIDROLÓGICO, CALIDAD DEL AGUA Y CONTROL DE LA EUTROFICACIÓN EN EL LAGO DE ZAPOTLÁN (MÉXICO)

TECNOLÓGICO DE MONTERREY

TESIS
PRESENTADA POR:

ING. ALEJANDRO D'URQUIZA DIAZ

Presentada ante la Dirección Académica de la Universidad Virtual del
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Como Requisito Parcial para Obtener
El Título de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

MAYO DE 2004

MODELO HIDROLÓGICO, CALIDAD DEL AGUA Y CONTROL DE LA EUTROFICACIÓN EN EL LAGO DE ZAPOTLÁN (MÉXICO)

TECNOLÓGICO DE MONTERREY®

TESIS
PRESENTADA POR:

ING. ALEJANDRO D'URQUIZA DÍAZ

Presentada ante la Dirección Académica de la Universidad Virtual del

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Como Requisito Parcial para Obtener

El Título de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

MAYO DE 2004

MODELO HIDROLÓGICO, CALIDAD DEL AGUA Y CONTROL DE LA EUTROFICACIÓN EN EL LAGO DE ZAPOTLÁN (MÉXICO)

TECNOLÓGICO DE MONTERREY®

TESIS
PRESENTADA POR:

ING. ALEJANDRO D'URQUIZA DÍAZ
Ingeniero Ambiental por el
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Presentada ante la Dirección Académica de la Universidad Virtual del

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Como Requisito Parcial para Obtener

El Título de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES

MAYO DE 2004

DEDICATORIA

Dedico la realización de esta tesis:

A Karla, la mujer de mi vida, quien nunca ha dejado de otorgarme todo su apoyo, su comprensión y su lealtad durante nuestros años juntos. Su amor siempre ha sido mi principal motivación.

A Leonardo, mi hijo recién nacido el 5 de abril del año en curso, quien me ha dado el vigor y la fortaleza para desarrollar sin reparos esta tesis.

A mis padres, Manuel y Rebeca, quienes junto con mi hermano Manuel, siempre me han impulsado y dotado de ánimos en mi vida académica y profesional. Sus sacrificios han sido invaluables para mi formación, así como sus enseñanzas, su ejemplo inquebrantable ante la adversidad y su pleno cariño sin condiciones.

A mis queridos amigos: César Real, Raymundo Mejía, Luis Miguel López, Enrique Villaseñor, Iván Valdovinos, Eduardo Mancilla, Jorge Ricardo Salazar, Eduardo Lizárraga, José Morales e Iñigo Arricaberri, con quienes he compartido memorables días, y de quienes he recibido su ayuda en los momentos de mayor necesidad.

A mi asesor de esta tesis, Dr. José de Anda Sánchez, quien confió en la calidad de mi trabajo y cuyo profesionalismo me mantuvo siempre interesado y comprometido con mi investigación a través de su guía y orientación.

A mi jefe, Dr. Oscar Aguilar Juárez, quien me ha permitido no sólo colaborar profesionalmente con él durante los últimos tres años, sino que además ha hecho posibles mis estudios de Maestría y desarrollo de esta tesis para el Centro de Calidad Ambiental del Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara.

A mis profesores de Maestría, Ing. Ignacio Luján Figueroa y Dr. Enrique Cázares Rivera, quienes influyeron profundamente en mí a través de sus clases.

A mis profesores de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, especialmente al M.C. Nicolás Hernández Gil y al M.C. Roberto Farías Sánchez, quienes inculcaron en mí el amor hacia mi profesión y la admiración por la ciencia e ingeniería en general.

RECONOCIMIENTOS

El autor desea expresar sus más sinceras formas de gratitud a:

- Dr. José de Anda (asesor de esta tesis), del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. [CIATEJ], por la confianza depositada en mí en los ámbitos académico y profesional, y por buscar siempre formas de brindarme su apoyo en todos los niveles.

- Dr. Oscar Aguilar Juárez y M.C. Randall Coffie Goedhoop (sinodales de esta investigación), del Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara, por su valiosa colaboración durante el desarrollo de mi trabajo de tesis.

- Dr. Teófilo Dieck Abularach, del Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, por su constante afán en apoyarme creyendo en mi potencial.

- Lic. Pedro Gaeta Hernández e Ing. Trinidad Mendoza Chávez, del Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, así como al M.C. Javier Clausen, de la Universidad ITESO, por su profeso interés hacia mi trabajo de tesis.

- Ing. Felipe Tito Lugo Arias e Ing. Carlos Hernández Solís, de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], por facilitarme la valiosa información que nutrió mi trabajo de tesis.

- M.C. Mario Alberto Ortiz-Jiménez, del Instituto Tecnológico de Tepic, y Geog. Ricardo García de Alba, del Centro Universitario del Sur de la Universidad de Guadalajara, por sus invaluables contribuciones e información en apoyo directo a mi trabajo de tesis.

- Los integrantes del equipo de trabajo de la Universidad Virtual del Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara, especialmente a Roberto Fuentes, Aldo López, Juan Francisco Espinoza y Jeziel Sánchez, por la calidad de su trabajo y apoyo durante la realización de mis estudios de Maestría.

Ing. Alejandro D'Urquiza Díaz.
Mayo de 2004.

RESUMEN

MODELO HIDROLÓGICO, CALIDAD DEL AGUA Y CONTROL DE LA EUTROFICACIÓN EN EL LAGO DE ZAPOTLÁN (MÉXICO)

MAYO DE 2004

ING. ALEJANDRO D'URQUIZA DÍAZ

INGENIERO AMBIENTAL
INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN SISTEMAS AMBIENTALES
INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

Dirigida por el Dr. José de Anda Sánchez

El presente trabajo de tesis se ha llevado a cabo para ayudar a comprender la dinámica del Lago de Zapotlán y de su cuenca, con un énfasis particular en aspectos de hidrología, calidad del agua y control de la eutroficación,

La orientación de la tesis seguida a lo largo de la investigación fue la capacitación, uso y generación de modelos, entendiendo a éstos como herramientas para aproximar la realidad de modo que pueda comprenderse mejor un problema complejo para así proponer su solución. Esto se concretó a través de la aplicación de las habilidades adquiridas durante los estudios de maestría, concretamente mediante la vinculación de disciplinas como la modelación de calidad del agua, el desarrollo de sistemas de información geográfica, la ejecución de métodos estadísticos de análisis, la programación de métodos numéricos y la planeación estratégica ambiental.

A pesar de ser un cuerpo de agua de importancia estratégica para el sur de Jalisco, poca ha sido la atención de que ha sido objeto hasta apenas recientemente. De esta forma, partiendo de la necesidad de generar información, se propuso un modelo hidrológico para describir al Lago de Zapotlán de acuerdo a su geometría y dimensiones, balance volumétrico y tiempos de retención hidráulica a fin de contar con las bases de cálculo necesarias para iniciar un proyecto de gestión de cuerpos de agua. Después, se llevó a cabo el análisis

estadístico de datos de calidad del agua generados para el estudio en cuestión, para reconocer posibles correlaciones entre los parámetros de calidad del agua del Lago de Zapotlán. Por otra parte, se utilizaron herramientas de modelación y simulación computarizada para comprender la distribución de contaminantes dentro del lago, y entender la dinámica del proceso de eutroficación.

Finalmente, a partir de una revisión y ponderación de los mecanismos y técnicas de control de la eutroficación disponibles mediante una técnica desarrollada por el autor de esta tesis, se expidió una recomendación de las estrategias de control de este fenómeno para el Lago de Zapotlán.

En su conjunto, el resultado final de este trabajo admite usarlo a su vez como herramienta de modelación de la calidad del agua del Lago de Zapotlán, teniendo utilidad práctica inmediata en el análisis de la eutroficación del lago, y de la recomendación de estrategias de control de la misma, así como en la comprensión y simulación de sistemas o procesos ambientales de influencia directa sobre el lago.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA i
RECONOCIMIENTOS ii
RESUMEN iii
TABLA DE CONTENIDO v
LISTA DE FIGURAS vii
LISTA DE TABLAS ix

1. INTRODUCCIÓN 1
1.1. Generalidades 1
1.2. Definición del problema 4
1.2.1. Situación problemática 4
1.2.2. Problema de investigación 5
1.3. Objetivos 7
1.3.1. Objetivo general 7
1.3.2. Objetivos particulares 7
2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES 8
2.1. Contaminación de cuerpos lacustres 8
2.2. Construcción de Sistemas de Información Geográfica para el análisis de calidad del agua de cuerpos lacustres 9
2.3. Modelación matemática de la calidad del agua en lagos 11
2.4. Simulación computarizada de la calidad del agua en lagos 16
2.5. Modelación de la eutroficación en lagos 18
2.6. Técnicas de control de la eutroficación en lagos 20
2.7. La Cuenca del Lago de Zapotlán 22
2.7.1. Localización de la cuenca 22
2.7.2. Fisiografía de la cuenca 22
2.7.3. Geología de la cuenca 23
2.7.4. Edafología de la cuenca 24
2.7.5. Usos del suelo de la cuenca 25
2.7.6. Precipitación y clima de la cuenca 26
2.7.7. Hidrología superficial de la cuenca 30
2.7.8. Batimetría del lago 36
2.7.9. Población de la cuenca 39
3. METODOLOGÍA 42
3.1. Hipótesis de investigación 43
3.2. Materiales y métodos 44
3.2.1. Modelación y balance hidrológico del Lago de Zapotlán 44
3.2.2. Monitoreos de calidad del agua 54
3.2.3. Construcción de un SIG para el Lago de Zapotlán 57
3.2.4. Determinación de zonas espaciales de anoxia en el Lago de Zapotlán 58
3.2.5. Modelación de la eutroficación en el Lago de Zapotlán 60
3.2.5.1. Determinación de la tasa de crecimiento de fitoplancton a partir del cálculo de la intensidad de la luz 62

3.2.5.2. Descripción del Método del Punto Medio para resolver sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias 65
4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN 68
4.1. Modelo hidrológico del Lago de Zapotlán 68
4.1.1. Modelo hidrogeométrico del Lago de Zapotlán 68
4.1.2. Balance volumétrico del Lago de Zapotlán 73
4.1.3. Tiempos de Retención Hidráulica del Lago de Zapotlán 79
4.2. Análisis de la calidad del agua en el Lago de Zapotlán 82
4.2.1. Análisis estadístico de parámetros de calidad del agua 84
4.2.2. Distribución espacial de contaminación del agua 88
4.2.3. Tendencias espaciales de anoxia 91
4.3. La eutroficación del Lago de Zapotlán 93
4.3.1. Nutrientes limitantes en el lago 93
4.3.2. Distribución espacial de nutrientes en el lago 95
4.3.3. Solución del modelo de eutroficación 96
5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 99
5.1. Opciones de prevención y control de la eutroficación en el Lago de Zapotlán 99
5.1.1. Técnicas de prevención de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán 101
5.1.2. Técnicas de control de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán 106
5.1.3. Recomendaciones específicas de técnicas de prevención y control de la eutroficación para el Lago de Zapotlán 108
5.2. Propuesta de investigaciones futuras en torno al Lago de Zapotlán 110
6. CONCLUSIONES 115

ANEXOS
A. PRECIPITACIÓN SOBRE LA CUENCA DEL LAGO DE ZAPOTLÁN 119
B. DATOS HIDROMÉTRICOS ÚTILES PARA EL BALANCE VOLUMÉTRICO DEL LAGO DE ZAPOTLÁN 123
C. TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA 126
D. RESULTADOS DE LOS MONITOREOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL LAGO DE ZAPOTLÁN HECHOS POR CIATEJ, A. C. EN 2003 127
E. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD Y TOMA DE DECISIONES EN CUANTO A ALTERNATIVAS DE CONTROL DE EUTROFICACIÓN 138
F. GRÁFICAS DE LAS REGRESIONES POLINOMIALES DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL LAGO DE ZAPOTLÁN 147
G. DATOS USADOS EN EL ESCENARIO DE SOLUCIÓN DEL MODELO DE EUTROFICACIÓN 151

REFERENCIAS Y FUENTES BIBLIOGRÁFICAS 154
VITA DEL AUTOR 157

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
Figura 1.1.	Imagen Satelital de la Cuenca del Lago de Zapotlán	2
Figura 2.1.	Interrelación Conceptual de los Elementos y Factores de un Sistema Lacustre	20
Figura 2.2.	Detalle de la *Carta Edafológica Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976)	25
Figura 2.3.	Detalle de la *Carta de Uso del Suelo Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976)	26
Figura 2.4.	Detalle de la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991)	28
Figura 2.5.	Detalle de la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991)	29
Figura 2.6.	Ubicación Relativa de las Estaciones Meteorológicas en la Cuenca del Lago de Zapotlán	30
Figura 2.7.	Hidrografía de la Cuenca del Lago de Zapotlán	33
Figura 2.8.	Ejes Carreteros Próximos al Lago de Zapotlán –Fotografía Aérea-	35
Figura 2.9.	Configuración Batimétrica Preliminar del Lago de Zapotlán	36
Figura 2.10.	Detalle del *Plano General de Topobatimetría de la Laguna de Zapotlán*	38
Figura 3.1.	Ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua en el Lago de Zapotlán	56
Figura 4.1.	Linealización del Modelo Morfométrico del Lago de Zapotlán	70
Figura 4.2.	Volúmenes Mensuales de Entrada al Lago de Zapotlán	77
Figura 4.3.	Volúmenes Mensuales de Salida del Lago de Zapotlán	78
Figura 4.4.	Balance Volumétrico para el Lago de Zapotlán	79
Figura 4.5.	Representaciones Gráficas de las Correlaciones de Parámetros de Calidad del Agua	88
Figura 4.6.	Distribución Espacial de Cloruros (mg/L)	89
Figura 4.7.	Distribución Espacial de DBO (mg/L)	89
Figura 4.8.	Distribución Espacial de Turbidez (NTU)	89
Figura 4.9.	Distribución Espacial de Dureza Total (mg/L como $CaCO_3$)	89
Figura 4.10.	Distribución Espacial de Salinidad (μh/cm)	90
Figura 4.11.	Distribución Espacial de Sólidos Disueltos Totales (mg/L)	90
Figura 4.12.	Distribución Espacial de Coliformes Totales (NMP/100mL)	90

Figura	Descripción	Pág.

Figura 4.13. Distribución Espacial de Coliformes Fecales (NMP/100mL)..... 90
Figura 4.14. Distribución Espacial de *Escherichia Coli* (NMP/g)..... 91
Figura 4.15. Distribución Espacial de Oxígeno Disuelto (mg/L)..... 93
Figura 4.16. Distribución Espacial de Fósforo Total (mg/L)..... 95
Figura 4.17. Distribución Espacial de Fósforo Disuelto Total (mg/L)..... 95
Figura 4.18. Distribución Espacial de Nitrógeno Orgánico Total (mg/L)..... 95
Figura 4.19. Solución Hipotética del Modelo de Eutroficación..... 97
Figura 5.1. Estado Trófico del Lago de Zapotlán según el Criterio de Vollenweider..... 104
Figura F.1. Ajuste Polinomial del Volumen en Función de la Profundidad Máxima..... 147
Figura F.2. Ajuste Polinomial del Área Superficial en Función de la Profundidad Máxima..... 148
Figura F.3. Ajuste Polinomial del Volumen en Función del Área Superficial..... 149
Figura F.4. Ajuste Polinomial del Área Superficial en Función del Volumen..... 150

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pág.
Tabla 1.1.	Usos del Agua Extraída del Lago de Zapotlán	2
Tabla 2.1.	Tipos de Suelos Predominantes en las Zonas Aledañas al Lago de Zapotlán	24
Tabla 2.2.	Usos del Suelo en las Zonas Aledañas al Lago de Zapotlán	25
Tabla 2.3.	Precipitación Media Anual Ponderada para el Lago de Zapotlán	27
Tabla 2.4.	Arroyos que Desembocan en el Lago de Zapotlán	34
Tabla 2.5.	Levantamiento Batimétrico del Lago de Zapotlán	37
Tabla 2.6.	Localidades del Municipio de *Gómez Farías*	39
Tabla 2.7.	Localidades del Municipio de *Zapotlán el Grande*	40
Tabla 2.8.	Proyecciones de Población de la Cuenca de Zapotlán en el Período 2000-2020	41
Tabla 3.1.	Promedios Mensuales de Parámetros Hidrométricos para el Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002	49
Tabla 3.2.	Factor *k* en Función de la Cobertura y Permeabilidad del Suelo	51
Tabla 3.3.	Parámetro K Ponderado para la Cuenca del Lago de Zapotlán.	51
Tabla 3.4.	Extracciones Mensuales del Lago de Zapotlán	52
Tabla 3.5.	Coordenadas Geográficas de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua en el Lago de Zapotlán	56
Tabla 4.1.	Logaritmos Naturales de las Variables Geométricas del Lago de Zapotlán	69
Tabla 4.2.	Parámetros de la Linealización del Modelo Morfométrico del Lago de Zapotlán	69
Tabla 4.3.	Coeficientes Constantes de las Regresiones Polinomiales de las Variables Geométricas del Lago de Zapotlán	71
Tabla 4.4.	Descripción Geométrica del Lago de Zapotlán en Función de las Cotas Superficiales de Acuerdo con el Levantamiento Batimétrico de 2003	72
Tabla 4.5.	Descripción Geométrica del Lago de Zapotlán en Función de las Cotas Mensuales Promedio para el Período 1982-2002	72
Tabla 4.6.	Volúmenes Mensuales de Descargas y Extracciones para el Lago de Zapotlán, según CEAS	74
Tabla 4.7.	Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Entrada al Lago de Zapotlán por Precipitación	75

Tabla	Descripción	Pág.

Tabla 4.8. Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Entrada al Lago de Zapotlán por Escorrentías Superficiales..... 75
Tabla 4.9. Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Salida del Lago de Zapotlán por Evaporación..... 76
Tabla 4.10. Balance Volumétrico del Lago de Zapotlán..... 76
Tabla 4.11. Entradas y Salidas Totales de Agua para el Lago de Zapotlán..... 77
Tabla 4.12. Tiempos de Retención Hidráulica para el Lago de Zapotlán, según sus Salidas..... 80
Tabla 4.13. Tiempos de Retención Hidráulica para el Lago de Zapotlán, según sus Entradas..... 81
Tabla 4.14. Cocientes de Incumplimiento de los Canales de Aguas Residuales de los Municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande* Respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996..... 83
Tabla 4.15. Coeficientes de Variación de los Parámetros para los Puntos de Monitoreo Lacustres..... 85
Tabla 4.16. Promedios Geométricos para Suprimir la Variación Temporal de los Datos de Calidad del Agua..... 86
Tabla 4.17. Matriz de Comparación de Coeficientes de Correlación de Pearson *r*..... 87
Tabla 4.18. Coeficientes Constantes de las Regresiones Lineales de Parámetros de Calidad del Agua del Lago de Zapotlán..... 87
Tabla 4.19. Direcciones de Incremento en Valores de Parámetros de Calidad del Agua..... 91
Tabla 4.20. Nutrientes Limitantes en el Lago de Zapotlán..... 94
Tabla 5.1. Cálculo de la Carga Superficial de Ortofosfato Disuelto..... 103
Tabla 5.2. Recomendación de Técnicas de Prevención y Control de la Eutroficación para el Lago de Zapotlán..... 109
Tabla A.1. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de Atoyac durante el Período 1982-2002..... 119
Tabla A.2. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de San Gregorio durante el Período 1982-2002..... 120
Tabla A.3. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de Ciudad Guzmán durante el Período 1982-2002..... 121
Tabla A.4. Precipitación Mensual Ponderada sobre la Cuenca del Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002..... 122
Tabla B.1. Altitudes de la Superficie del Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002..... 123

Tabla	Descripción	Pág.

Tabla B.2. Contribuciones Volumétricas de las Descargas Residuales de los Municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande* al Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002 124
Tabla B.3. Pérdidas de Agua por Evaporación en el Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002 125
Tabla C.1. Técnicas de Preservación de Muestras para el Análisis de Parámetros Específicos de Calidad del Agua 126
Tabla D.1. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 1 127
Tabla D.2. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 2 128
Tabla D.3. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 3 129
Tabla D.4. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 4 130
Tabla D.5. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 5 131
Tabla D.6. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 6 132
Tabla D.7. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 7 133
Tabla D.8. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 8 134
Tabla D.9. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 9 135
Tabla D.10. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 10 136
Tabla D.11. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 11 137
Tabla E.1. Factores Propuestos de Ponderación de *Impacto Benéfico* 140
Tabla E.2. Factores Propuestos de Ponderación de *Factibilidad* 140
Tabla E.3. Ejemplo de los Coeficientes de Valor de la Variable de Decisión *Impacto Benéfico* para las Alternativas Técnicas Analizadas 141
Tabla E.4. Ejemplo de los Coeficientes de Valor de la Variable de Decisión *Factibilidad* para las Alternativas Técnicas Analizadas 142
Tabla E.5. Cálculo del Índice de *Impacto Benéfico* a partir de sus Productos Ponderados 143
Tabla E.6. Cálculo del Índice de *Factibilidad* a partir de sus Productos Ponderados 144

Tabla	Descripción	Pág.

Tabla E.7. Toma de Decisiones en cuanto a las Alternativas de Prevención y Control de la Eutroficación según su Viabilidad..... 145

Tabla E.8. Prioridades para las Alternativas de Prevención y Control de la Eutroficación en función de su Viabilidad..... 146

Tabla G.1. Datos Específicos para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación..... 151

Tabla G.2. Datos Calculados para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación..... 151

Tabla G.3. Datos Típicos Disponibles en la Literatura para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación 152

Tabla G.4. Datos Estimados para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación 153

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, primeramente se mencionan las generalidades del Lago de Zapotlán y su importancia estratégica de tipo ambiental y económica para el Estado de Jalisco, México. Posteriormente, se explican los impactos negativos de las actividades antropogénicas sobre el lago, y se justifica la necesidad de la investigación desarrollada en esta tesis, detallando su objetivo general y sus objetivos particulares.

1.1. Generalidades

La Cuenca del Lago de Zapotlán se encuentra al sur del Estado de Jalisco, México. El Lago de Zapotlán, con una profundidad media entre 1.5m y 2.6m abarca una superficie de aproximadamente 1,248.39ha (*Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna*, 2002), distribuida entre los municipios de *Gómez Farías* y *Zapotlán el Grande*, cuyas cabeceras municipales son, respectivamente, las zonas urbanas de San Sebastián (al norte del lago) y Ciudad Guzmán (al sur del lago). La cuenca se encuentra contenida entre las coordenadas 19°35' y 19°54' de latitud norte, y entre las coordenadas 103°25' y 103°36' de longitud oeste (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003). Además, la altura media sobre el nivel del mar aproximada para la superficie del lago es cercana a los 1500msnm (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

La importancia económica del Lago de Zapotlán destaca debido a su uso recreativo para actividades deportivas, además de la agricultura y cría de peces, así como el valor estético del lago con potencialidades ecoturísticas debido a la belleza natural de los parajes de serranía de la cuenca. En la siguiente página, la Figura 1.1. muestra una imagen satelital de la Cuenca del Lago de Zapotlán, en la cual se han resaltado sus límites, destacándose además el volcán *Nevado de Colima* en su porción suroeste, y el propio lago en la región centro-noreste de la cuenca. Véase además la Tabla 1.1. con los usos del agua extraída del lago.

La forma en la cual los más de 100,000 habitantes (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003) de la cuenca hacen uso de los recursos naturales de la zona, ha causado impactos ambientales severos al lago, principalmente en la forma de contaminación del agua debida a descargas agrícolas y municipales, cuyos contaminantes están en constante resuspensión debido a la escasa

profundidad media del lago. Esto implica pérdidas económicas en términos del costo de oportunidad al no poder aprovechar sustentablemente tanto al líquido como a los sistemas productivos asociados a éste, tales como la acuacultura o la pesca comercial y recreativa.

Tabla 1.1. Usos del Agua Extraída del Lago de Zapotlán.

Uso del Agua Extraída del Lago de Zapotlán	Demanda Anual (Mm^3)	Demanda Anual (%)
Agrícola	8.5	65%
Urbano	2.5	19%
Pecuario y otros servicios	2.1	16%
Total	*13.1*	*100%*

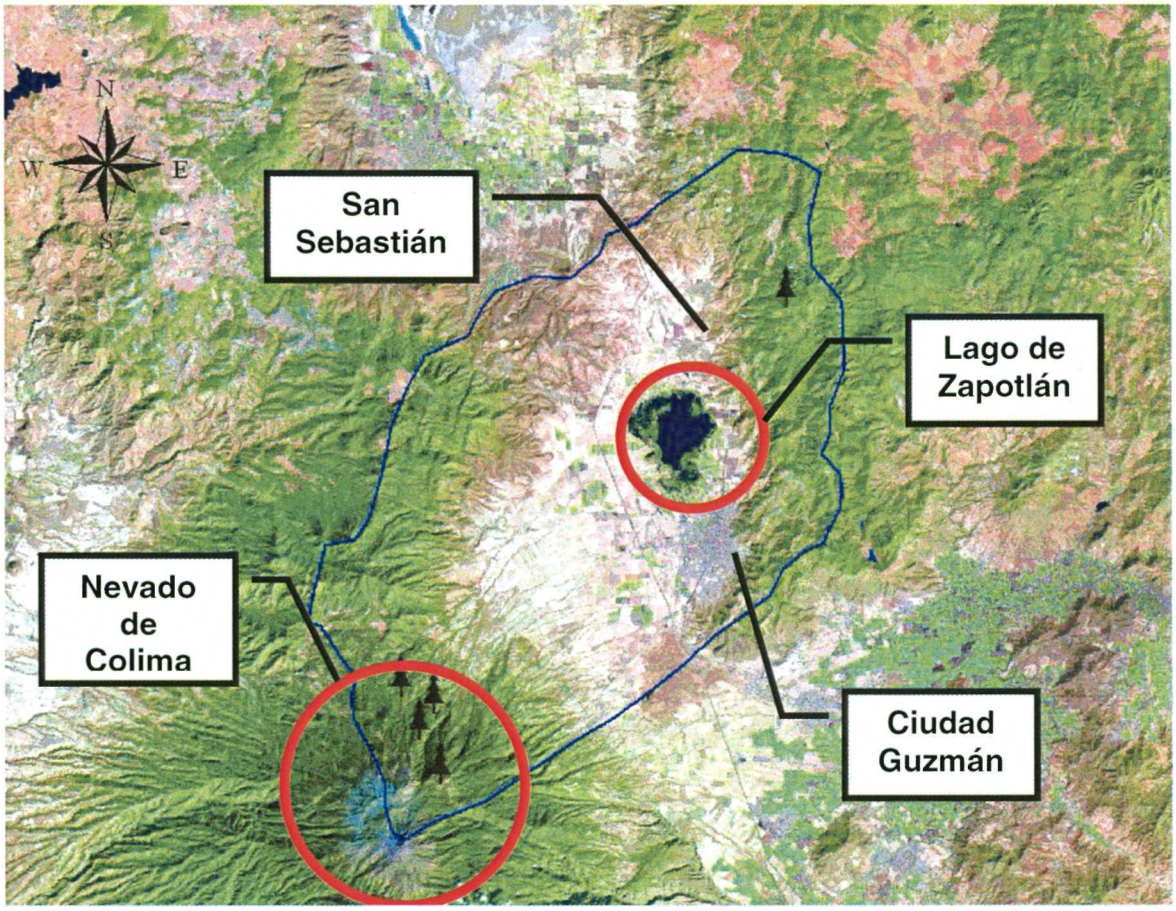

Figura 1.1. Imagen Satelital de la Cuenca del Lago de Zapotlán (Cortesía del Geog. Ricardo García de Alba, del Centro Universitario del Sur [CUSUR], Universidad de Guadalajara).

Aunado a la situación anterior, la problemática queda sin conocerse en su dimensión real al no contarse con información ambiental pertinente sobre el lago, lo cual exige la postulación de trabajos de investigación y estudios relacionados

entre sí para lograr un diagnóstico ambiental sistémico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

Después de una búsqueda de información actual sobre la cuenca en bancos de datos de información pública de periódicos locales de Jalisco, se encontró que los habitantes del municipio de Zapotlán se consideran a sí mismos como prestadores de servicios regionales médicos, turísticos y hoteleros, entre otros (por lo que dependen de la salud ecológica de la cuenca para poder prestar tales servicios), pero que en su opinión, los servicios de suministro de agua potable, drenaje y alcantarillado se han deteriorado durante la anterior administración de Gobierno Municipal (la cual terminó funciones en diciembre de 2003). Al mismo tiempo, las autoridades de dicha administración apoyaban el crecimiento urbano en "*la laguna*",[1] como localmente se le denomina al Lago de Zapotlán (El Informador. Diario Independiente, 2002).

Además de la información disponible en periódicos locales, para la Cuenca del Lago de Zapotlán existe el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) realizado por la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS] para entender principalmente el funcionamiento del vaso lacustre, así como el *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002), el cual es una propuesta de plan parcial de desarrollo de la cuenca, presentada por la Universidad de Guadalajara. Sin embargo, la intención principal del plan anterior no es la generación de información ambiental relevante para la cuenca, sino el crecimiento urbano y la potenciación económica de su influencia sobre el Estado de Jalisco.

El trabajo de investigación realizado en esta tesis consiste en uno de varios proyectos paralelos relacionados con la Cuenca del Lago de Zapotlán (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003). Así, el trabajo de investigación aquí presentado se encuentra relacionado con al menos los trabajos de investigación en el área ambiental de un estudiante de doctorado y otros dos estudiantes de maestría, todos ellos desarrollados actualmente en diferentes instituciones de educación superior o de investigación científica y tecnológica en México (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003).

De esta forma, el trabajo de investigación correspondiente a esta tesis se enfoca hacia la caracterización de la calidad del agua del lago a través de la solución de modelos matemáticos y el uso de herramientas de simulación computarizada, así como a la recomendación de estrategias para el control de la eutroficación en el lago. Dentro de este marco, la investigación a la cual se refiere esta tesis buscó hacer un análisis de la calidad del agua del Lago de

[1] Técnicamente, el término *laguna* es incorrecto para denominar al vaso lacustre de Zapotlán: la acepción hidrológica de *laguna* se refiere comúnmente a un cuerpo de agua salobre con salida al mar.

Zapotlán, mediante la creación de un Sistema de Información Geográfica [SIG] para usarlo a su vez como herramienta de modelación de las condiciones de calidad del agua del mismo, teniendo utilidad práctica inmediata en el análisis de la eutroficación del lago, y de la recomendación de estrategias de control de la misma.

1.2. Definición del problema

A continuación, se hace una descripción de la situación problemática general, así como del problema de investigación de esta tesis en lo particular:

1.2.1. Situación problemática

Además de su uso para actividades deportivas, las aguas del Lago de Zapotlán son empleadas para la producción agrícola y pecuaria, sin considerar el valor turístico potencial del lago. Aparte de su importancia económica estratégica en los niveles local y regional, la influencia del Lago de Zapotlán se extiende por todo América del Norte, dado que algunos de los productos agrícolas cosechados en su cuenca son exportados a los Estados Unidos para su consumo, y el lago mismo se encuentra además en la ruta de migración de aves provenientes de Canadá, las cuales vuelan a tierras mexicanas durante la estación del invierno (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003).

El atractivo inherente del Lago de Zapotlán ha atraído a nuevos residentes a su cuenca, la cual alberga actualmente a más de 100,000 habitantes, y se proyecta que para el año 2015 haya más de 117,000 (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003). De esta forma, el impacto de las actividades antropogénicas (en la forma de descargas agrícolas y municipales, principalmente) han acelerado la degradación de la calidad del agua, provocando a su vez afectaciones sistémicas a la salud de los habitantes de la cuenca, y la aceleración de la eutroficación del lago (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003).

La degradación de la calidad del agua ha traído asimismo la afectación de los valores estéticos del lago, problemas de salud humana (en la forma de enfermedades infecciosas agudas y crónicas de tipo digestivo, respiratorio y

cutáneo), olores, reducción de la fauna nativa y migratoria, y la proliferación no controlada de algas verde-azules en el lago, siendo el caso de *Microcystis* y de *Anabaena flossaquae*, como es señalado por de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al. (2003), lo cual es un síntoma de un estado avanzado de eutroficación (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989).

De la misma forma, la eutroficación del Lago de Zapotlán se encuentra en un nivel avanzado, evidenciado por las extensiones superficiales cubiertas por *Eichornia crassipes* –lirio acuático- y *Typha latifolia* -tule- (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003). Incluso, la contaminación del agua del Lago de Zapotlán podría escalar hasta ser motivo de preocupación para los consumidores extranjeros de los productos agrícolas de la cuenca, quienes podrían alegar problemas de seguridad alimentaria en los productos agrícolas irrigados con tal recurso hídrico, resultando en un cese potencial en las exportaciones de productos agropecuarios de la cuenca.

De esta forma, el detrimento de la calidad del agua del Lago de Zapotlán trae consigo afectaciones negativas de tipo económico a la cuenca, relacionadas con la pérdida del costo de oportunidad del atractivo turístico del lago, disminución en la producción de peces para consumo humano, y reducción del rendimiento de los productos agrícolas de la región, los cuales son comúnmente exportados a los Estados Unidos para su consumo, pero podrían dejar de serlo por motivos de seguridad alimentaria en caso de que en este país se consideren más estrictamente los potenciales riesgos a la salud humana por el consumo de los productos agrícolas de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

Así, es necesario llevar a cabo un diagnóstico de la contaminación del Lago de Zapotlán, a fin de conocer el estado actual de contaminación del agua del lago, comprender sistémicamente la dinámica de los contaminantes en los recursos hídricos de la cuenca (particularmente en el lago), y finalmente, recomendar y proponer estrategias y mecanismos de control del proceso de eutroficación sufrido actualmente por el Lago de Zapotlán.

1.2.2. Problema de investigación

El problema general a cuya solución quiere contribuir esta investigación es resolver la carencia de información ambiental sobre la Cuenca del Lago de Zapotlán, mediante la generación de datos de calidad de agua e información actualizada de tipo ambiental para la integración de un diagnóstico el cual sirva como herramienta de gestión sustentable de la cuenca de interés. Asimismo, el problema específico el cual busca resolver la investigación tesis es la necesidad

de diseñar y recomendar una estrategia de control del proceso de eutroficación al cual está sometido el Lago de Zapotlán, a través del estudio de modelos de calidad del agua del lago.

De esta forma, de acuerdo con de Anda (2003), el desarrollo de un modelo de calidad del agua para el Lago de Zapotlán permitiría impulsar el desarrollo sustentable del lago y su cuenca con un énfasis particular en la cantidad y calidad del agua. Así, es necesario conocer los niveles tróficos de las aguas del lago, para así emitir recomendaciones específicas para el control de la eutroficación en el Lago de Zapotlán.

En este contexto, la investigación presentada en esta tesis busca cumplir con la generación de una base de información científica, sobre la cual sustentar en trabajos posteriores la evaluación biológica de la cuenca dentro del diagnóstico ambiental de la misma. Concretamente, el trabajo de investigación en cuestión busca la descripción fisicoquímica de la calidad del agua del Lago de Zapotlán.

Para la caracterización fisicoquímica del agua del Lago de Zapotlán, se enfrentó el reto de generar la mayor parte de la información necesaria para el estudio, consistiendo principalmente en: (a) un SIG del Lago de Zapotlán, y (b) datos de calidad del agua del lago.

A partir de la construcción de un SIG particular para el Lago de Zapotlán (destacando características del vaso lacustre tales como su morfometría y batimetría), y de la recolección de datos de calidad del agua a partir de muestreos en puntos específicos, se procedió a aplicar los modelos matemáticos y computacionales que hicieron posible describir en una primera aproximación los sistemas de calidad del agua del lago, a fin de poder conocer y predecir dentro de ciertos límites, los niveles de contaminación en el lago. Asimismo, el uso de herramientas de modelación matemática (numérica) y software especializado permitió comprender mejor los sistemas de calidad del agua del lago, profundizando en los parámetros relacionados con el estado de eutroficación del vaso lacustre, y establecer finalmente recomendaciones estratégicas orientadas al control de la eutroficación del Lago de Zapotlán.

De esta forma, el desarrollo de un modelo numérico de simulación de calidad del agua (específicamente de eutroficación) para cuerpos lacustres, según se ha indicado en esta tesis, permitirá en proyectos posteriores impulsar el desarrollo sustentable del Lago de Zapotlán y su cuenca con énfasis en la cantidad y calidad del agua, examinar la respuesta del lago bajo diferentes condiciones y prácticas de manejo y predecir el futuro desarrollo ambiental y productivo del lago.

1.3. Objetivos

El trabajo de tesis contenido en este escrito busca cumplir con un objetivo general y varios objetivos particulares, todos ellos descritos a continuación:

1.3.1. Objetivo general

- Desarrollar un modelo hidrológico de calidad del agua para el Lago de Zapotlán, el cual sirva de apoyo para la toma de decisiones en proyectos para el control de la eutroficación del vaso lacustre.

1.3.2. Objetivos particulares

- Realizar un balance volumétrico del Lago de Zapotlán a partir del desarrollo de un modelo morfométrico del vaso lacustre.
- Obtener valores confiables de parámetros de calidad del agua a partir de cuando menos dos monitoreos radiales de muestras de agua del Lago de Zapotlán en puntos geo-referenciados.
- Construir un Sistema de Información Geográfica del Lago de Zapotlán, enfatizando la calidad del agua del vaso lacustre.
- Realizar la simulación computarizada y análisis bidimensional de los sistemas de calidad del agua del Lago de Zapotlán.
- Identificar zonas anóxicas y tendencias espaciales de anoxia dentro del lago.
- Adaptar y resolver un modelo matemático de calidad del agua asociado al proceso de eutroficación del lago.
- Analizar mecanismos de control de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán.
- Emitir recomendaciones en cuanto a estrategias de control de la eutroficación para el Lago de Zapotlán.

2. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

Una de las limitaciones principales al abordar el problema del Lago de Zapotlán es la carencia de información descriptiva en términos ambientales sobre la cuenca en la cual se ubica el vaso lacustre. A este respecto, no existen esfuerzos previos de investigación sobre las dinámicas ambiental, social y económica de la cuenca, mucho menos acerca de la vinculación entre éstas.

Debido a lo anterior, el marco teórico de esta investigación no descansa principalmente sobre investigaciones previas hacia la solución de la problemática (véase el Capítulo 1), sino sobre los aspectos generales relacionados con la comprensión de los sistemas de calidad del agua en cuerpos de agua lénticos (i.e. lagos y presas), así como la revisión de trabajos de investigación sobre la eutroficación del Lago de Chapala, uno de los cuerpos lacustres naturales más cercanos a la Cuenca del Lago de Zapotlán, descrita en este capítulo.

Así, en la revisión del marco teórico fue conveniente en primera instancia hacer una revisión de las actividades generales que provocan la contaminación de los cuerpos lacustres, para luego mencionar aquellos aspectos y factores necesarios a considerar para la construcción de un Sistema de Información Geográfica adecuado para la investigación a la cual se refiere esta tesis. Además, se presenta a continuación una recapitulación general de las consideraciones y limitaciones comunes para hacer la construcción de modelos matemáticos de calidad del agua en lagos, seguida de la presentación del software *RAISON*™ para plantear la simulación computarizada de los modelos de calidad del agua en el Lago de Zapotlán. Más adelante, se incluyen comentarios generales referentes a la modelación de la eutroficación en lagos, haciendo referencia a trabajos de investigación realizados en el Lago de Chapala, cuya cuenca ampliada podría considerarse como vecina de la Cuenca del Lago de Zapotlán. Finalmente, al final de este Capítulo 2 se hace mención sobre las técnicas disponibles para el control de la eutroficación en lagos justo antes de presentar una descripción general sobre aspectos de interés de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

2.1. Contaminación de cuerpos lacustres

Las actividades antropogénicas provocan la degradación de la calidad del agua de los cuerpos lacustres cuando sus impactos sobrepasan su capacidad de

autodepuración (Guzmán, M., 1997). Así, las actividades que tienen mayor afectación son aquellas que provocan alteraciones a la cuenca hidrológica (tales como agricultura y desarrollo urbano), alteraciones a la línea de la ribera (presencia de embarcaderos, por ejemplo), alteraciones al cuerpo de agua (tales como la construcción de diques, puentes o canales), alteraciones por manejo de agua (por ejemplo, extracción del agua para consumo), alteraciones de la calidad del agua (es decir, descargas de contaminantes) y alteraciones biológicas -por ejemplo, la interrupción de ciclos migratorios o la reducción de las cadenas tróficas- (Guzmán, M.,1996).

Las actividades anteriores afectan a los lagos en seis mecanismos generales, los cuales se relacionan entre sí: *salinización acelerada*, *descenso del nivel del agua*, *contaminación con sustancias tóxicas*, *acidificación*, *eutroficación* y *el exterminio de ecosistemas y biota.* (Programa Ambiental de las Naciones Unidas [UNEP], 1994). Estos mecanismos forman sistemas complejos en sus relaciones negativas para los cuerpos de agua, de modo que su comprensión llega a ser limitada en la mayoría de los casos, debido a la intrincada red de formas posibles en los cuales los agentes químicos, físicos y biológicos contaminan a los sistemas acuáticos (Thibodeaux, L. J., 1996). Sin embargo, una aproximación a los efectos de las relaciones sistémicas de calidad del agua puede inferirse a partir de los valores específicos de diversos parámetros de calidad del agua, tales como la demanda bioquímica de oxígeno, la concentración de nutrientes, la temperatura del agua, la cantidad de oxígeno disuelto en el líquido y la presencia de grasas y aceites, entre otros (Romero, J. A., 1999). Por lo tanto, al enfrentar problemas ambientales relacionados con la calidad del agua, es necesario definir los parámetros que servirán de indicadores para el análisis y caracterización de las dimensiones de la extensión y avance del nivel de contaminación en cuerpos de agua.

2.2. Construcción de Sistemas de Información Geográfica para el análisis de calidad del agua de cuerpos lacustres

De acuerdo con la *United States Geological Survey* (2003), un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema computarizado capaz de construir, almacenar, manipular y mostrar información geográficamente referenciada (datos identificados según sus locaciones). Un SIG puede ser empleado para representar características bidimensionales o tridimensionales de la superficie terrestre desde puntos de información (por ejemplo, monitoreos de calidad del agua). De esta forma, es posible estimar las características de estas secciones desde un número limitado de mediciones puntuales. Así, pueden crearse capas

con el modelado de determinados factores o fenómenos, los cuales pueden ser analizados en un SIG con otros mapas representando el área en cuestión.

Asimismo, según Rodríguez (2000), es necesario reunir la siguiente información para generar un Sistema de Información Geográfica [SIG] adecuado para el análisis de datos de calidad del agua de un lago:

- Ubicación (coordenadas) de la cuenca.
- Ubicación (coordenadas) del vaso lacustre.
- Descripción fisiográfica de la cuenca y del vaso lacustre.
- Aspectos climatológicos de la cuenca.
- Morfometría y batimetría del lago.
- Hidrología superficial de la cuenca.
- Obras hidráulicas de la cuenca.
- Precipitación y evaporación.
- Nivel del lago (cotas).
- Ubicación de puntos de monitoreo de calidad del agua.
- Datos de calidad del agua.

En esta tesis, los puntos anteriores fueron considerados en la elaboración del SIG particular para el Lago de Zapotlán, para así proceder con la modelación de la calidad del agua de dicho vaso lacustre, a través de las funciones y capacidades de los SIG para el estudio de los sistemas ambientales en general.

Por otra parte, la proyección es un componente fundamental de la construcción de mapas. Una proyección es un medio matemático para transferir información de la superficie terrestre (tridimensional y curvada) a un medio bidimensional (papel o una pantalla de computadora). En cuanto a las proyecciones de los mapas usados para la construcción de SIG, para el caso de México es común el uso de la Proyección UTM (Universal Transversa de Mercator), la cual es una proyección cilíndrica en la cual se representa el ecuador en magnitud real, y las loxodromas como líneas rectas (las loxodromas, también conocidas como líneas de rumbo, son líneas en las cuales el rumbo geográfico se mantiene constante, de modo que los meridianos y paralelos se representan como líneas rectas formándose ángulos de 90° entre ellas, lo que la hace una proyección *conforme*, es decir con todos sus ángulos iguales). El eje del cilindro de la proyección es transversal al eje de rotación de la tierra, y la proyección de la superficie terrestre se hace sobre la superficie del cilindro. Los paralelos se separan cada vez mas provocando que los polos se sitúen en el infinito. Las proyecciones UTM pueden ser *tangentes* si tocan la superficie de la Tierra únicamente en el ecuador, o *secantes*, si el cilindro de proyección corta a la Tierra en dos paralelos (usualmente, los trópicos). La deformación de la superficie terrestre representada en las proyecciones UTM disminuye entre más se acerque la porción representada a los paralelos de contacto de la proyección con la superficie de la Tierra (Monmonier, M. S., 1996).

2.3. Modelación matemática de la calidad del agua en lagos

Cuando un contaminante específico forma parte de un sistema de calidad del agua, el transporte y destino del mismo dependerá en primera instancia de sus propiedades fisicoquímicas, así como de las características del cuerpo de agua (Hemond, H.F. & Fechner, E.J., 1994). A continuación, se describen los pasos comunes en el establecimiento de modelos de calidad del agua para contaminantes específicos, de acuerdo al siguiente procedimiento general para cada contaminante (Thomann, R. V. & Mueller, J. A., 1987):

1. Obtención de información relevante sobre el lago.
2. Contextualización sobre la base de la información disponible sobre el lago, y su problemática en general.
3. Identificación de las "entradas" y "salidas" de contaminación al volumen de control del lago. Entre las entradas, puede encontrarse la descarga directa en el lago, la infiltración por corrientes subterráneas, el transporte por advección en corrientes tributarias, las escorrentías superficiales, la resuspensión de sedimentos y la deposición por precipitación. Asimismo, entre las salidas, pueden existir la advección en corrientes de escape del lago (incluyendo extracciones de agua para consumo, ríos y exfiltraciones), la sedimentación en el fondo del lago (sobre todo para el caso de lagos profundos, en los que el ingreso de contaminantes al volumen de sedimentos se considera como una salida del volumen de agua del lago), la volatilización superficial en procesos de evaporación y evapotranspiración.
4. Un caso especial de "salida" de contaminante es la consideración de la degradación del contaminante por procesos biológicos o bioquímicos dentro del lago. La mayoría de estas degradaciones siguen una cinética de primer orden (como por ejemplo: la degradación anaerobia de la materia orgánica y producción de metano en fase gas).
5. Elaboración de un modelo (ecuación diferencial basada en un balance de masa de contaminante) el cual explique el comportamiento de la concentración del contaminante en el lago.
6. Cálculo de la constante de degradación del contaminante, y corrección para la temperatura promedio del agua.
7. Dado el caso, cálculo o estimación de las constantes de sedimentación, resuspensión y/o volatilización del contaminante.

Aunque los pasos anteriores son comunes para todos los contaminantes, es necesario además analizar su efecto conjunto, pues pueden presentarse

relaciones entre diferentes contaminantes, tales como la co-precipitación o neutralización.

Cabe mencionar las diferentes suposiciones que se suelen seguir para simplificar los modelos de calidad del agua (Chapra, S. C., 1997):

- Se identifican como mecanismos de entrada a la advección, la resuspensión y la generación *in situ*.
- Se identifican como mecanismos de salida a la advección, la sedimentación y la degradación (reacción química o biológica).
- Para un intervalo de tiempo dado, se considera como constante al volumen del lago; esto implica que la suma de todos los flujos volumétricos de entrada se considere aproximadamente igual a la suma de todos los flujos volumétricos de salida.
- Se asume que solamente la fracción sólida del contaminante es sedimentable.
- Se supone que el rango de temperaturas en el lago no es muy grande en comparación con su valor promedio, de modo que se desprecia el efecto de cualquier variación temporal en la temperatura del agua sobre el valor de la constante de degradación del contaminante corregida para una temperatura promedio del agua.
- Se considera que el lago se comporta como un *Reactor Tanque de Mezcla Completa* (RTMC), de modo que se asume una concentración uniforme en el agua del lago, y por tanto, que la concentración en el efluente es igual a la concentración en el volumen de agua contenido dentro del lago (Fogler, H. S., 1999).
- Para lagos someros (cuya profundidad máxima sea menor a los 10m), puede despreciarse el transporte vertical de contaminantes, por lo cual una simulación bidimensional suele ofrecer resultados confiables con respecto a valores reales.
- Para efectos de aproximación a un valor medio de concentración, se supone que el sistema se encuentra en estado estable, es decir, sin acumulación de masa de contaminante en el agua del lago. En otras palabras, el flujo másico de contaminante a través del volumen de agua contenido en el lago se considera constante.

A fin de ejemplificar la construcción general de una expresión para la dinámica de un parámetro de calidad del agua (concentración de una sustancia) a partir de un balance masa de un determinado contaminante en el volumen de control del lago, se presentan las siguientes expresiones concebidas de acuerdo con Chapra, S. C. (1997) y Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). Primero, se parte de la Ecuación General de Balance de Masa:

$$Acumulación = \sum_i (Entradas)_i - \sum_j (Salidas)_j - Degradación \qquad (2.1)$$

La acumulación de un contaminante se define como el cambio de su flujo másico $\overset{o}{m}$ a través del lago (expresado en notación de Leibniz como):

$$\overset{o}{m} \equiv \frac{dm}{dt} \tag{2.2}$$

donde m es la masa del contaminante en el lago, y t es el tiempo.

Sin embargo, usualmente los parámetros de calidad del agua se expresan como concentraciones de contaminantes en el agua de un lago, y no como su masa total en el volumen del control, por lo que es necesario escribir la Ecuación (2.2) en términos de concentración; para ello, considérese la definición de concentración de un contaminante en el volumen de control C:

$$C \equiv \frac{m}{V} \tag{2.3}$$

donde V es el volumen de control. Despejando la Ecuación (2.3) para m y sustituyéndola en (2.2), la acumulación se expresó como:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt}(CV) \tag{2.4}$$

Nótese que la Ecuación (2.4) es la derivada de un producto, por lo que su desarrollo es:

$$\frac{dm}{dt} = V\frac{dC}{dt} + C\frac{dV}{dt} \tag{2.5}$$

No obstante, dado que para los cortos períodos de tiempo en que se considera válida la Ecuación (2.5) el volumen permanece aproximadamente constante, ésta se simplifica hasta la expresión:

$$\frac{dm}{dt} = V\frac{dC}{dt} \tag{2.6}$$

De tal manera, el miembro derecho de la Ecuación (2.6) se utiliza para expresar matemáticamente la acumulación de un contaminante en un volumen de control dentro de un lago para períodos cortos de tiempo.

Por otra parte, en cuanto a las entradas de un contaminante al volumen de control, las descargas directas D en el lago suelen expresarse como funciones de carga orgánica W en función del tiempo:

$$D = W(t) \tag{2.7}$$

Asimismo, el transporte de materia por advección en las corrientes de entrada A_e (ríos o arroyos tributarios, infiltraciones o escorrentías) se expresa para cada corriente de entrada sencillamente como el producto del caudal de la corriente de entrada en particular Q_e, por la concentración del contaminante en la corriente de entrada C_e:

$$A_e = \sum_k (Q_e C_e)_k \tag{2.8}$$

donde el subíndice k indica la k-ésima corriente de entrada al volumen del control del lago.

Por otra parte, para el caso de contaminantes que presenten deposición L sobre la superficie del lago debido a la precipitación P (expresada usualmente como milímetros de lluvia por metro cuadrado de superficie), su entrada en el lago se calcula como:

$$L = PA_{\sup} C_p \tag{2.9}$$

donde A_{sup} es el área superficial del espejo de agua y C_p es la concentración del contaminante en el agua de lluvia. Nótese que en la Ecuación (2.9), las unidades de P deben ser consistentes con las del área superficial. En general, son pocos los contaminantes que ingresan a un lago por el agua de lluvia, pero entre ellos pueden considerarse al ácido sulfúrico de la lluvia ácida o a las partículas suspendidas en la atmósfera, por mencionar algunos ejemplos.

Ahora bien, si se consideran las salidas de un contaminante del volumen de control, el transporte de materia por advección hacia afuera del lago A_s (ríos, extracciones o exfiltraciones) se expresa para cada corriente de salida como el producto del gasto volumétrico de la corriente de salida en particular Q_s, por la concentración del contaminante en la corriente de salida C_s:

$$A_s = \sum_l (Q_s C_s)_l \tag{2.10}$$

donde el subíndice l indica la l-ésima corriente de entrada al volumen del control del lago.

En cuanto a la volatilización v de un contaminante, es usual expresar un coeficiente de volatilización v_V de la fracción soluble de un contaminante f_s en términos de flux (es decir, flujo volumétrico a través de una superficie), con unidades de $L^3T^{-1}L^{-2}$ (usualmente, $m^3/[s \cdot m^2]$). Su expresión matemática es de la forma:

$$v = v_v A_{\sup} f_s C \tag{2.11}$$

Similarmente, la sedimentación efectiva S (es decir, la diferencia neta entre la sedimentación de un contaminante y su resuspensión) también se expresa en

términos de *flux*[2] mediante un coeficiente de sedimentación v_S con unidades de $L^3T^{-1}L^{-2}$ (usualmente, $m^3/[s \cdot m^2]$). No obstante, se asume que sólo la fracción sólida (es decir, el complemento a uno de la fracción soluble) es susceptible de sedimentarse. Su expresión matemática es de la forma:

$$S = v_S A_{\sup}(1 - f_s)C \tag{2.12}$$

Nótese que en un sentido estricto las unidades de los coeficientes de volatilización y de sedimentación efectiva pueden expresarse como LT^{-1}, por lo que es común reportar las unidades de estos coeficientes en *m/s*, por ejemplo. Sin embargo, las unidades anteriores no reflejan mecanísticamente a los procesos de volatilización y sedimentación como procesos de superficie.

Finalmente, para expresar las degradaciones de contaminantes $(V[dC/dt])_d$, cuando éstas son de primer orden (como sucede en la mayoría de los casos para efectos ambientales de degradación), las degradaciones se expresan como:

$$\left(V\frac{dC}{dt}\right)_d = -\kappa CV \tag{2.13}$$

donde κ es la constante de degradación del contaminante. Usualmente, estas constantes se reportan a 20°C, por lo que es necesario corregirlas por temperatura de acuerdo con la siguiente Ecuación (2.14):

$$\kappa_T = \kappa\theta^{T-20} \tag{2.14}$$

donde κ_T es a constante de degradación del contaminante corregida por temperatura, θ es un factor adimensional de corrección por temperatura (el cual se puede determinar fácilmente a partir de la conocida Ecuación de Arrhenius), y T es la temperatura del agua en grados Celsius.

De esta forma, sustituyendo las Ecuaciones (2.6) a (2.14) en (2.1), se genera la Ecuación General de Calidad del Agua para expresar la concentración de un contaminante dentro de un volumen de control en un lago:

$$V\frac{dC}{dt} = W(t) + \sum_k (Q_e C_e)_k + PA_{\sup}C_p - \sum_l (Q_s C_s)_l - \left[v_V f_s + (1 - f_s)v_S\right]A_{\sup}C - \kappa_T CV \tag{2.15}$$

La Ecuación (2.15) admite algunas simplificaciones. La más importante es que, dado que se está suponiendo un mezclado perfecto, continuo e inmediato, todas las concentraciones de salida son iguales a la concentración C dentro del volumen de control, por lo que la expresión anterior puede escribirse como:

---

[2] Un *flux* es un flujo másico o volumétrico (en función del tiempo) en dirección ortogonal con respecto a un área transversal a la cual atraviesa. Es decir, es un flujo por unidad de área.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{V}\left[W(t) + \sum_k (Q_e C_e)_k + PA_{\sup} C_p - \left\{\sum_l (Q_s)_l - [v_V f_s + (1 - f_s) v_S] A_{\sup} - \kappa_T V\right\} C\right] \tag{2.16}$$

De esta forma, la Ecuación (2.16) es una Ecuación Diferencial Ordinaria la cual puede resolverse numéricamente para la concentración *C*. Desde luego, la Ecuación (2.16) puede simplificarse posteriormente dependiendo del caso estudiado, dado que para determinados contaminantes en particular podrían omitirse los términos de precipitación, volatilización, sedimentación o advección de entrada, por ejemplo.

Por otra parte, a fin de obtener una aproximación de la concentración promedio esperada en el volumen de control del lago, usualmente se considera que el sistema llega al estado estacionario, por lo que:

$$\frac{dC}{dt} = 0 \tag{2.17}$$

Así, la Ecuación (2.16) puede despejarse para la concentración en estado estacionario como:

$$C = \frac{W(t) + \sum_k (Q_e C_e)_k + PA_{\sup} C_p}{\sum_l (Q_s)_l - [v_V f_s + (1 - f_s) v_S] A_{\sup} - \kappa_T V} \tag{2.18}$$

Desde luego, cabe señalar que la Ecuación (2.18) es tan sólo una aproximación de los valores reales de concentración que podrían encontrarse en el volumen de control de un lago.

2.4. Simulación computarizada de la calidad del agua en lagos

Retomando la Ecuación (2.16) de la sección anterior, si se admiten los siguientes cambios de variable:

$$\bar{W} \equiv W(t) + \sum_k (Q_e C_e)_k + PA_{\sup} C_p \tag{2.19}$$

$$\lambda \equiv V\left\{\sum_l (Q_s)_l - [v_V f_s + (1 - f_s) v_S] A_{\sup} - \kappa_T V\right\} \tag{2.20}$$

Es posible entonces escribir la Ecuación (2.16) como:

$$\frac{dC}{dt} + \lambda C = \frac{\bar{W}}{V} \tag{2.21}$$

donde λ es el valor característico[3] de la Ecuación (2.21). Se ha introducido en esta tesis la notación de la Ecuación (2.21) en función de su valor característico λ dado que se ha venido manejando convenientemente el concepto de volumen de control. Si el volumen de control no se hace igual al volumen de todo el lago, sino tan sólo una porción de éste, puede afinarse el cálculo suponiendo varios volúmenes de control en serie y/o en paralelo (según el caso) dentro del lago. De hecho, este enfoque puede llevarse hasta el extremo de volúmenes de control infinitesimales (o al menos muy pequeños) conectados entre sí dentro del lago (algo así como visualizar el volumen del lago formado por *n* cubos de fluido dividido por una malla tridimensional). De esta forma, cada volumen de control tendría una expresión diferente para la Ecuación (2.16), o lo que es lo mismo, se podría definir el sistema para cada volumen de control en función de sus diferentes valores característicos λ junto con sus diversos valores de carga $\bar{W}$.

En otras palabras, el sistema se expresaría matricialmente en función de *n* Ecuaciones Diferenciales Ordinarias del tipo de la Ecuación (2.21), y podría resolverse numéricamente (mediante algoritmos computacionales).

De acuerdo con Rodríguez (2000), el programa *RAISON*™ permite manejar información de tipo cartográfica (i.e. mapas y planos bidimensionales), geográfica (i.e. coordenadas) y bases de datos (i.e. datos de calidad del agua para puntos de muestreo específicos). A su vez, el programa *RAISON*™ es capaz de generar reportes estadísticos (tales como regresiones, correlaciones y series de tiempo) y curvas de distribución (curvas de iso-concentración, por ejemplo).

No obstante, el programa *RAISON*™ sólo puede llevar a cabo análisis bidimensionales de calidad del agua, puesto que en lugar de admitir una modelación entre volúmenes de control infinitesimales, crea perfiles de iso-concentraciones superficiales mediante algoritmos de interpolación de valores de calidad del agua definidos por el usuario. De esta forma, el programa *RAISON*™ es adecuado para llevar a cabo no sólo la simulación de sistemas de calidad del agua en lagos someros, sino también el análisis estadístico de sus resultados.

[3] También llamado valor propio o *eigenvalor*.

2.5. Modelación de la eutroficación en lagos

La eutroficación es un proceso natural de envejecimiento de cuerpos de agua (i.e. lagos) en el cual aumenta la concentración de nutrientes orgánicos (nitrógeno y fósforo, siendo uno de éstos el nutriente limitante). El aumento en la concentración de nutrientes trae consigo el desarrollo de algas y demás plantas acuáticas, las cuales agotan el oxígeno disuelto del agua impidiendo así el desarrollo de la vida en el lago, y reduciendo la paulatinamente la profundidad del vaso lacustre al incrementar la cantidad de sedimentos en el fondo (Metcalf & Eddy, Inc., 1991). Asimismo, la eutroficación trae consigo problemas de color, olor y sabor en el agua, cambios en el pH (acidificación debido a la sobreproducción de CO_2) y el reemplazo de las especies biológicas nativas del lago por otras especies más resistentes al detrimento de la calidad del agua, como la Tilapia -*Cichlidæ sp.*- (Schnoor, J. L., 1996).

La eutroficación, a pesar de ser un proceso natural, puede ser acelerada por actividades antropogénicas, tales como prácticas agrícolas y el uso detergentes (Shear, H., 2000). Tal es el caso del Lago de Chapala (el lago mas grande de México, localizado entre el Estado de Jalisco y el Estado de Michoacán) para el cual se han desarrollado modelos de eutroficación basados en balances de fósforo (de Anda, J., Shear, H., Maniak, U. & Riedel, G., 2000, y de Anda, J., 2001). A partir de tales investigaciones, se ha comprendido mejor la dinámica de la eutroficación de este lago y su relación con la calidad del agua en función de los factores de la cuenca respectiva que la afectan, pero no existen aún trabajos similares para el Lago de Zapotlán.

De acuerdo con Schnoor (1996), para modelar las condiciones de eutroficación en lagos, se necesita considerar factores tales como:

- Temperatura.
- Intensidad de la luz
- Dimensiones del lago.
- Tiempo.
- Constantes cinéticas (tales como velocidades de degradación y de desarrollo de plancton).

Desde luego, es indispensable considerar la interacción de:

- Nutrientes (fósforo *P*, nitrógeno *N* y en alguno casos, silicio *Si*).
- Carga orgánica (carbono *C* orgánico).
- Zooplancton (biomasa) y Fitoplancton (biomasa de algas y cianobacterias y clorofila *a*).
- Peces (biomasa).

En cuanto al fósforo, es necesario además distinguir entre el fósforo orgánico y el inorgánico. De acuerdo con Chapra, S. C. (1997), el fósforo orgánico puede ser:

a) *Fósforo particulado:* Formado por el fósforo contenido en organismos vivos y detritos.
b) *Fósforo no particulado:* Formado por compuestos disueltos o coloidales los cuales contienen fósforo, y cuyo origen es la descomposición del fósforo orgánico particulado.
c) *Fósforo reactivo soluble:* Formado por las especies químicas de ortofosfatos (principalmente PO_4^{-3}). Estas especies son las que están disponibles para las plantas y microorganismos, y son por tanto, las principales responsables de la eutroficación.

Por su parte, el fósforo inorgánico puede ser:

a) *Fósforo particulado:* Formado por minerales de fosfatos, ortofosfato adsorbido a superficies arcillosas, y fosfatos acomplejados con materia sólida.
b) *Fósforo no particulado:* Constituido por fosfatos condensados tales como los encontrados en los detergentes.

En ambos casos, la división entre las formas particuladas y no particuladas se hace para señalar que las formas particuladas son susceptibles de sedimentación (Chapra, S. C. ,1997).

Finalmente, entre más avanzada sea la eutroficación de un lago, su estado trófico puede ser: oligotrófico, mesotrófico, eutrófico, politrófico o hipertrófico. No existe una barrera definida para determinar el estado trófico de un lago, pues éste depende no sólo de la cantidad de nutrientes en sus aguas (principalmente fósforo), sino además de su carga superficial q_s (la cual equivale al cociente entre el flujo volumétrico de salida del lago Q_s y el área superficial del mismo) y de su tiempo de residencia τ (Chapra, S. C., 1997). Normalmente, los criterios desarrollados hasta el momento para intentar determinar el estado trófico de un lago implican métodos gráficos en escala logarítmica involucrando cargas superficiales de nutrientes (fósforo), la profundidad media del lago y su tiempo de retención hidráulica, como es el caso del criterio de *Vollenweider* (Chapra, S. C., 1997), pero ninguno ha logrado definir fronteras inequívocas entre los estados tróficos posibles en un lago (véase el Capítulo 5 de esta tesis).

A continuación, la Figura 2.1. muestra la interrelación conceptual de los elementos y factores de un sistema lacustre eutroficado. En esta Figura 2.1., las flechas de mayor grosor indican la entrada de nutrientes al sistema. Nótese que la Figura 2.1. sólo considera al fósforo reactivo soluble entre los diferentes tipos de fósforo.

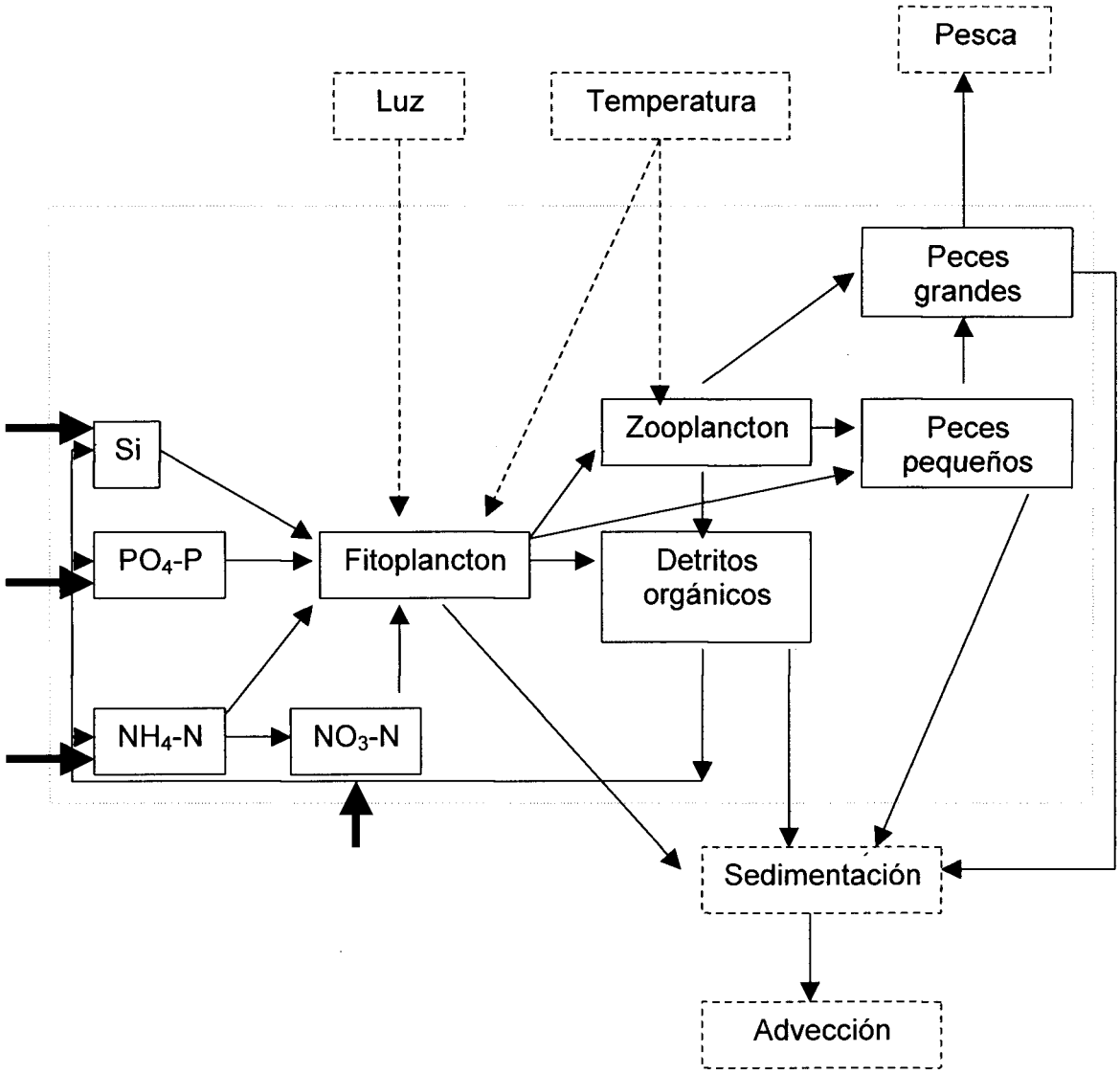

Figura 2.1. Interrelación Conceptual de los Elementos y Factores de un Sistema Lacustre, Propuesta según Schnoor (1996).

2.6. Técnicas de control de la eutroficación en lagos

Una vez que se ha caracterizado la calidad del agua de un cuerpo léntico, es decir, una presa o específicamente un lago como en el caso de esta tesis, es necesario tomar medidas en contra del proceso de eutroficación. En función de las características particulares de la cuenca (ubicación, topografía, ríos y arroyos

tributarios, tiempos de retención hidráulica, factores climáticos y actividades económicas en torno al vaso lacustre), es teóricamente posible planear estrategias de control del proceso de eutroficación, basadas en la adaptación de una o más técnicas orientadas a tal fin. La elección de las técnicas adecuadas para su aplicación en el caso específico del Lago de Zapotlán dependerá de tales factores mencionados. De esta forma, de acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), entre las técnicas disponibles para prevenir, tratar y controlar la eutroficación en lagos, se encuentran:

- Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.
- Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.
- Control en los usos del suelo de la cuenca.
- Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.
- Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.
- Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.
- Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.
- Canalización y derivación de aguas negras y residuales.
- Construcción de trincheras de escurrimiento.
- Inactivación de nutrientes en el lago.
- Incremento en los flujos de salida del lago.
- Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).
- Circulación forzada del agua del lago.
- Remoción selectiva de agua del hipolimnion.
- Disminución del nivel en el lago.
- Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.
- Dragado de sedimentos.
- Cosecha de plantas y algas en el lago.
- Control biológico de algas.
- Control químico de algas.

Existen otras alternativas efectivas sólo en el corto plazo, tales como la trituración de macrofitas las cuales se propagan rápidamente dado que sus semillas son arrastradas por el agua, tales como el lirio acuático o jacinto de agua (*Eichornia crassipes*), el tule (*Typha latifolia*) y el carrizo (*Arundo donax*), mismas que incrementan la evapotranspiración entre 28% y 30% con respecto la evaporación en áreas superficiales equivalentes, impiden el paso de la luz al cuerpo del agua y reducen la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. (González, A., 1996).

2.7. La Cuenca del Lago de Zapotlán

En esta sección se describe a la Cuenca del Lago de Zapotlán en términos de su localización, fisiografía, geología, edafología, usos del suelo, hidrología, precipitación y clima, batimetría del lago y población de la cuenca.

2.7.1. Localización de la cuenca

De acuerdo con el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003), la Cuenca del Lago de Zapotlán se encuentra aproximadamente a 135km de la Ciudad de Guadalajara, dentro de la denominada Región Hidrológica No. 12 (la cual comprende las grandes cuencas del Río Lerma, el Lago de Chapala y el Río Santiago) al sur del Estado de Jalisco. La superficie de la cuenca se distribuye sobre los municipios de Zapotlán el Grande (65%), Gómez Farias (33%) y pequeñas porciones territoriales pertenecientes a los municipios de Zapotiltic, Venustiano Carranza y Tuxpan (2%) para dar un total de más de 498km^2 (aproximadamente 49,836ha).

En cuanto a sus coordenadas geográficas, la cuenca se encuentra contenida entre las coordenadas 19°35' y 19°54' de latitud norte, y entre las coordenadas 103°25' y 103°36' de longitud oeste (de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al., 2003). Asimismo, el centro del Lago de Zapotlán se encuentra aproximadamente en las coordenadas 19°45' de latitud norte y 103°29' de longitud oeste. La altura media sobre el nivel del mar aproximada para la superficie del lago es inferior a los 1500msnm (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán,* 2003).

2.7.2. Fisiografía de la cuenca

La Cuenca del Lago de Zapotlán se compone de dos tipos principales de paisajes, como es señalado por García de Alba, R. (1988): un gran valle de topografía relativamente plana bordeado por un sistema de sierras entre las que destacan: la *Sierra del Tigre* en el este de la cuenca, así como la *Sierra de la Media Luna* (denominada así por el propio García de Alba) al oeste de la cuenca.

Dicha sierra se limita al norte con la *Sierra de Tapalpa* a través de la *Altiplanicie de El Pelillo*. En su extremo sur, la sierra termina en el volcán *Nevado de Colima*. El *Nevado de Colima* y la *Sierra de la Media Luna* se conectan con la depresión tectónica del Valle de Zapotlán. Asimismo, la Cuenca del Lago de Zapotlán se encuentra limitada al oriente por la *Sierra de los Manzanillos* al noreste y la *Montaña Oriente* al sureste (García de Alba, R., 1988).

El valle de Zapotlán es relativamente plano, mientras que las sierras que limitan el valle se levantan entre los 1600 y 1900msnm aproximadamente (*Carta Topográfica Ciudad Guzmán E13B25 Escala 1:50,000*, 1992) y *Carta Topográfica Sayula E13B15 Escala 1:50,000*, 1973), con la excepción obvia del volcán Nevado de Colima, cuya cima se encuentra en una elevación superior a los 4,240msnm (García de Alba, R., 1988).

2.7.3. Geología de la cuenca

De acuerdo con García de Alba, R. (1988), los siguientes elementos geomorfológicos se encuentran presentes en la Cuenca del Lago de Zapotlán:

- Areniscas calcáreas y calizas.
- Conglomerados.
- Basaltos.
- Dacitas.
- Tobas compactadas intermedias o mesosílicas.
- Tobas no compactadas intermedias o mesosílicas.
- Andesitas.
- Piroclásticos.
- Tobas estratificadas.
- Limos de solifluxión.
- Arenas y limos de los abanicos aluviales.
- Limos y arcillas fluviales y lacustres.

De esta forma, de acuerdo con los elementos geomorfológicos listados anteriormente, el origen de éstos es ígneo o sedimentario, dependiendo del caso (Blyth, F. G. H. & de Freitas, M. H., 1989).

Además, García de Alba, R. (1988) agrupó las unidades estructurales montañosas del relieve en función de su evolución geológica, como se presenta continuación:

1. Montañas de plegamiento: montañas de areniscas y calizas cubiertas de tobas y lavas.
2. Montañas volcánicas: el complejo volcánico del Nevado de Colima, montañas lavas basálticas y tobas, montañas de lavas dacíticas y tobas, y montañas de tobas y limos.

Por otra parte, se señala además que la Cuenca del Lago de Zapotlán es zona sísmica, y que de hecho la depresión del valle es de origen tectónico, situándose el Lago de Zapotlán sobre el *graben* del mismo nombre (García de Alba, R., 1988). Un *graben*, o *fosa tectónica*, es un bloque geológico con superficie plana el cual se hunde entre fallas (Blyth, F. G. H. & de Freitas, M. H., 1989).

Lo anterior es consistente con el origen tectónico / volcánico de las montañas de las sierras que limitan a la cuenca, así como con el arrastre de material geológico a las planicies la cuenca sedimentaria del valle donde se encuentra el Lago de Zapotlán.

2.7.4. Edafología de la cuenca

De acuerdo con la *Carta Edafológica Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976), los suelos predominantes en las zonas aledañas al Lago de Zapotlán, según la unidad de clasificación FAO / UNESCO 1970, modificada por la Comisión de Estudios del Territorio Nacional [CETENAL] son los indicados a continuación en el Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de Suelos Predominantes en las Zonas Aledañas al Lago de Zapotlán.

Clave	Tipo de suelo	Clase Textural
Hh / 2	Feozem Háplico	Media
Be / 2	Cambisol Eutrico	Media
Re / 2	Regosol Eutrico	Media

Lo anterior es confirmado por García de Alba, R. (1988), quien señala que en la cuenca se aprecia un predominio notable de suelos cambisoles (distribuidos geomorfológicamente en las zonas montañosas de interfluvios y vertientes cubiertas de limos), así como de regosoles (formados por limos de tobas no compactadas y son producto de la alteración de los abanicos aluviales en las faldas de los montes). Asimismo, los feozems se derivan de materiales aluviales finos del fondo plano del valle de Zapotlán.

A continuación, la Figura 2.2. muestra un detalle de la *Carta Edafológica Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976).

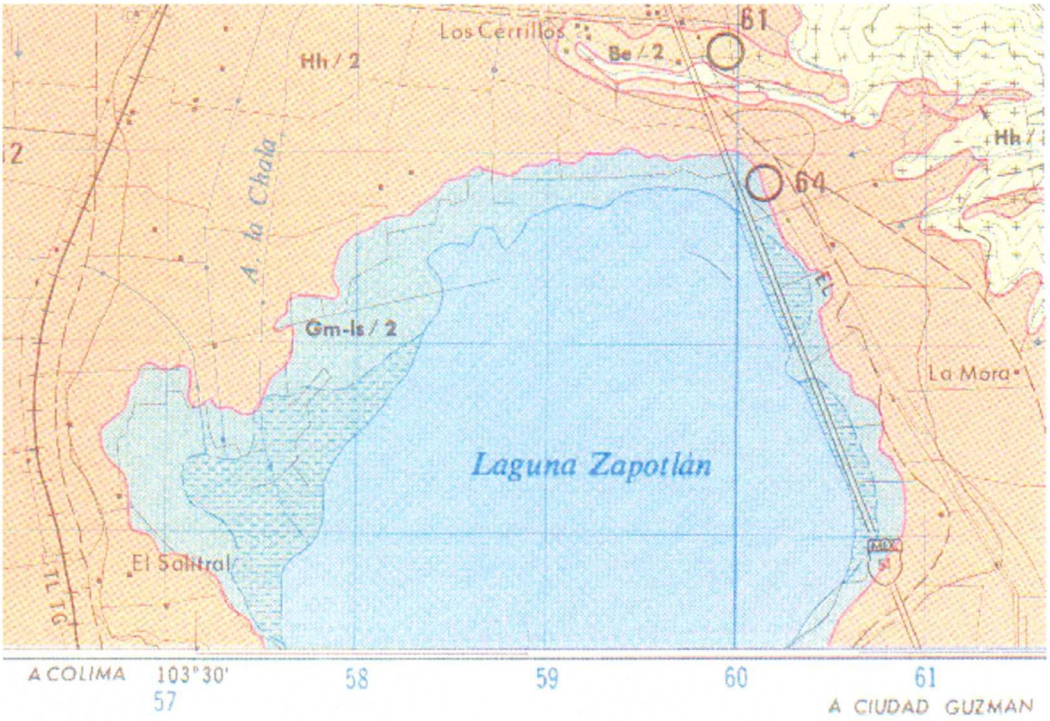

Figura 2.2. Detalle de la *Carta Edafológica Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976).

2.7.5. Usos del suelo de la cuenca

Según la *Carta de Uso del Suelo Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976), los usos del suelo en las zonas aledañas al Lago de Zapotlán corresponden en su totalidad a uso agrícola, salvo en la zona urbana de Ciudad Guzmán al sur del lago. Los diferentes usos agrícolas se listan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Usos del Suelo en las Zonas Aledañas al Lago de Zapotlán.

Clave	Uso del suelo
AtpA	Agrícola de Temporal Permanente Anual
ArSp	Agrícola de Riego Semipermanente
ArA	Agrícola de Riego Anual

A continuación, la Figura 2.3. muestra un detalle de la *Carta de Uso del Suelo Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976).

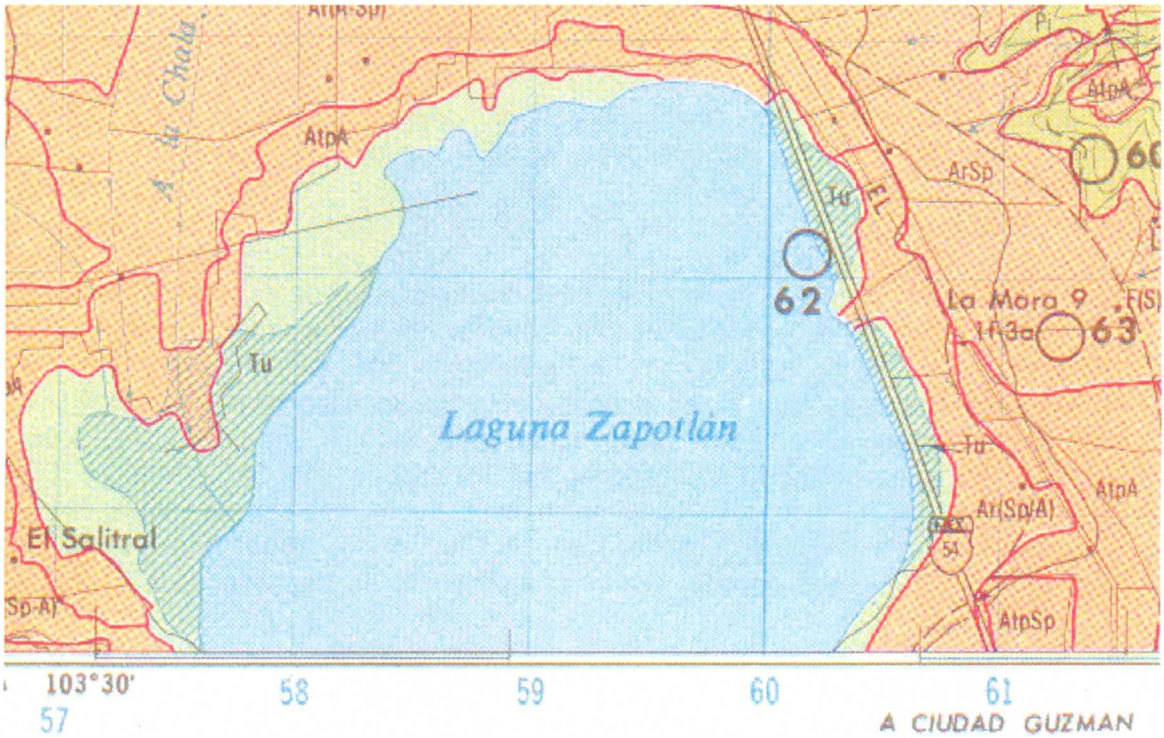

Figura 2.3. Detalle de la *Carta de Uso del Suelo Sayula E13B15 Escala 1:50,000* (1976).

2.7.6. Precipitación y clima de la cuenca

Para la caracterización de la precipitación y clima de la Cuenca de Zapotlán, es conveniente hacer la distinción entre la época de lluvias (típicamente entre mayo / junio y octubre) y la época de estiaje (usualmente entre noviembre y abril / mayo). Para tal fin, para la época de lluvias, se consultó la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991), mientras que para la época de estiaje se consultó la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991).

Ambas cartas poseen, para el caso de la Cuenca de Zapotlán, información de acuerdo a datos recolectados entre 15 y 29 años hasta 1980 en las estaciones meteorológicas 14-047 y 14-193. De acuerdo a ambas cartas, los vientos dominantes se dirigen hacia las direcciones norte y noreste (provenientes, por lo tanto, del sur y suroeste).

Por una parte, para la época de lluvias, la cuenca presenta durante los meses de mayo a octubre una temperatura máxima de aproximadamente 30°C, así como una temperatura mínima entre los 12°C y 15°C.

En cuanto a la precipitación promedio durante el período semestral de lluvias, de acuerdo a dicha carta, se tiene una precipitación típica entre los 550mm y 625mm de acuerdo a la isoyeta, con un promedio de 60 a 89 días con lluvia mayor a 0.1mm (*Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000*, 1991). Asimismo, de acuerdo con García de Alba, R., durante el verano son típicas las tormentas de aproximadamente 10 minutos de duración y una intensidad aproximada de 70mm/h (dando por resultado una precipitación promedio, por tormenta, de 11.7mm por metro cuadrado de superficie en tan sólo 10 minutos, por lo que las tormentas pueden incrementar rápidamente el volumen contenido en el lago por la precipitación directa sobre su superficie e indirectamente por las escorrentías resultantes).

Por otra parte, para la época de estiaje, la cuenca presenta durante los meses de noviembre a abril una temperatura máxima de aproximadamente 27°C, así como una temperatura mínima aproximada de 9°C.

A su vez, según el *Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002), la temperatura media anual en la cuenca es de 19°C.

En cuanto a la precipitación promedio durante el período semestral de estiaje, de acuerdo a dicha carta, se observa una precipitación típica entre los 25mm y 50mm de acuerdo a la isoyeta, con un promedio de 0 a 29 días con lluvia mayor a 0.1mm (*Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000*, 1991).

En las páginas siguientes, se incluyen las Figuras 2.4. y 2.5., mostrando un detalle de la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991) y de la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991), respectivamente.

Por otra parte, según la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS] a través del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003), se obtuvo una estimación más adecuada y actualizada de la precipitación real sobre la cuenca, mediante la ponderación de datos de tres estaciones meteorológicas (*Atoyac, San Gregorio* y *Ciudad Guzmán*), analizando los datos de los años 1982-2002 (véanse la Tabla 2.3. y la Figura 2.6., así como el Anexo A al final de esta tesis).

Tabla 2.3. Precipitación Media Anual Ponderada para el Lago de Zapotlán.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud *(msnm)*	Ponderación porcentual	Precipitación Media Anual *(mm)*
Atoyac	20°00'	103°31'	651.5	3%	573.9
San Gregorio	19°49'	103°23'	1,259.5	16%	1,258.6
Ciudad Guzmán	19°33'	103°54'	1,515.0	81%	733.5
Precipitación media anual ponderada para la Cuenca					***812.7***

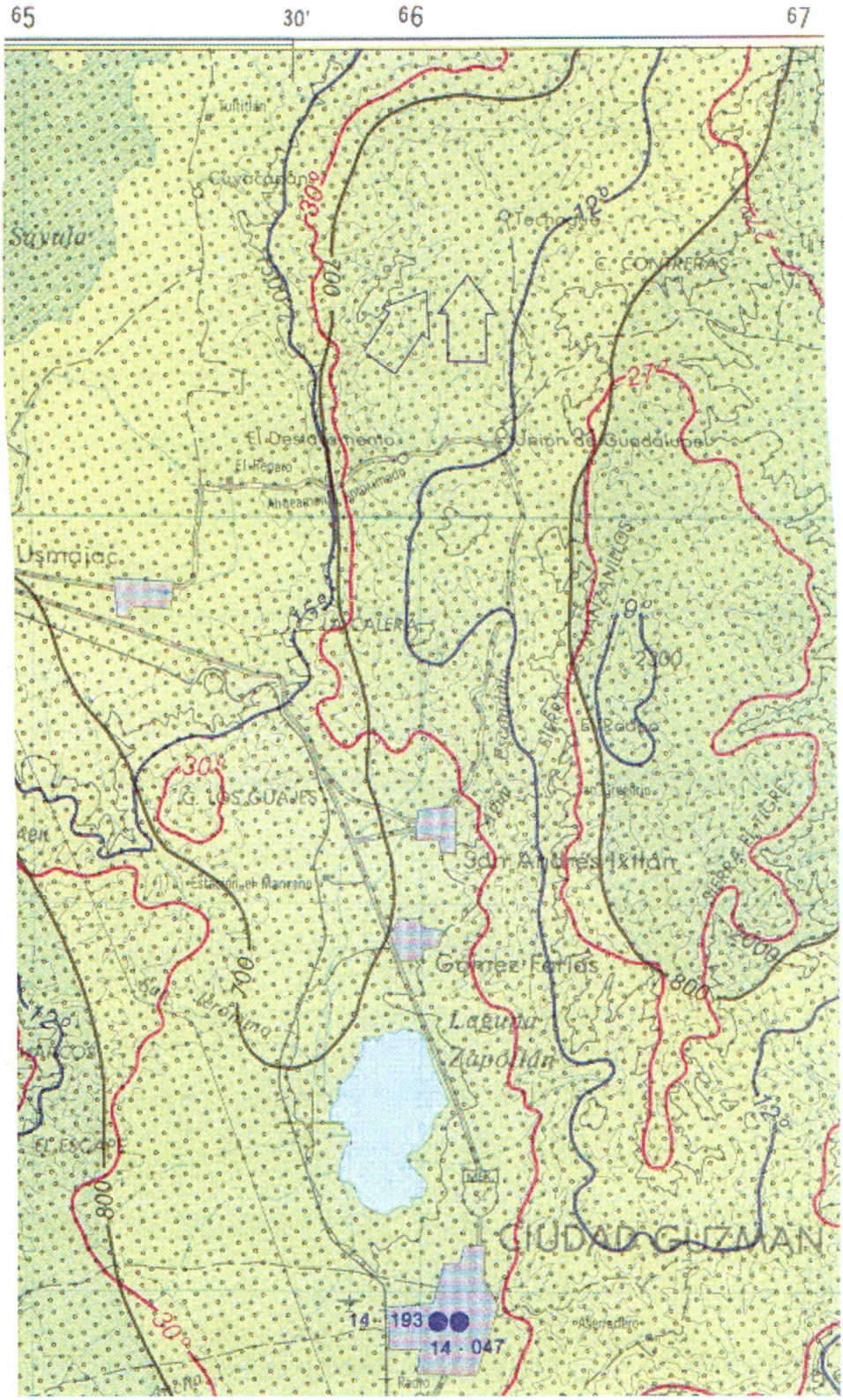

Figura 2.4. Detalle de *la Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991).

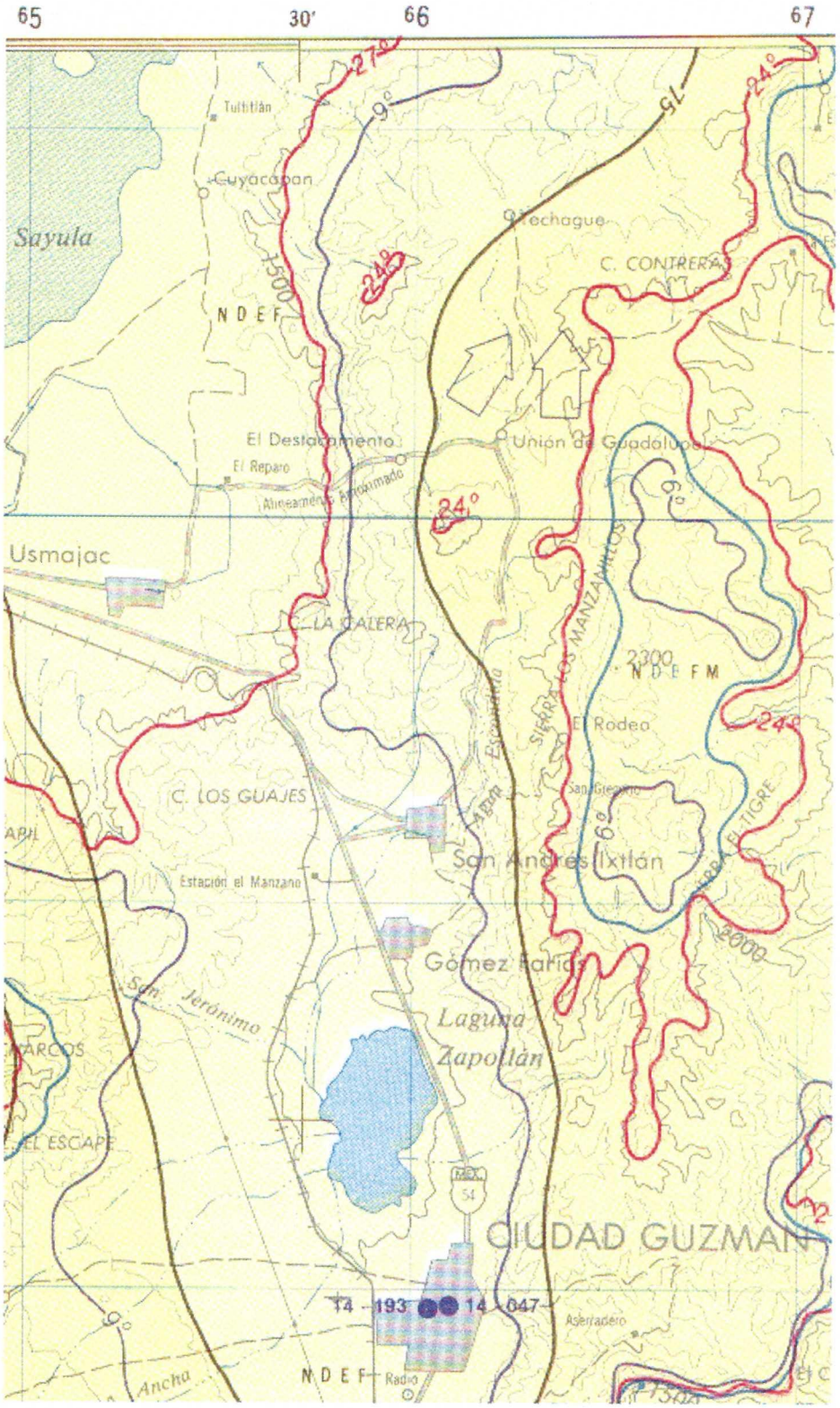

Figura 2.5. Detalle de la *Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000* (1991).

De esta forma, CEAS propone un valor de precipitación media de 812.7mm por año, con un valor mínimo de 566.5mm/año y un valor máximo de 1,231.6mm/año (consúltese la Tabla A.4. en el Anexo A al final de esta tesis). La distribución temporal de la precipitación ocurre como sigue: 88.5% entre los meses de junio a octubre, 8.3% entre los meses de enero a mayo, y 3.2% entre los meses de noviembre a diciembre. Asimismo, la temperatura promedio anual se registra entre los 18°C y 20°C (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

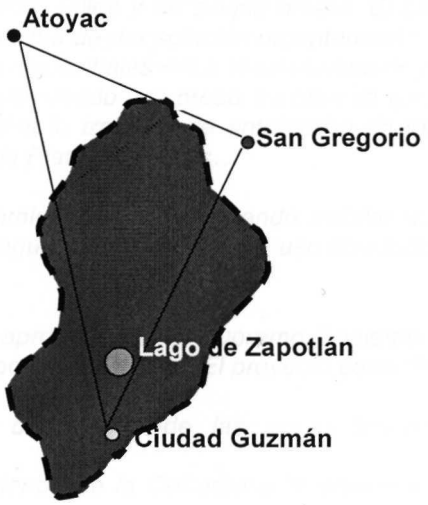

Figura 2.6. Ubicación Relativa de las Estaciones Meteorológicas en la Cuenca del Lago de Zapotlán. (Tomado del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

2.7.7. Hidrología superficial de la cuenca

La dinámica del agua en la Cuenca del lago de Zapotlán ha sido muy cambiante a lo largo de los años, según lo escrito por Cibrián, E. (1980). En dicha obra de 83 páginas, se describen algunos aspectos hidrológicos de interés, por lo cual se incluye a continuación un extracto de los fragmentos más significativos de tal texto:

"...Durante la época prehispánica, las tribus que habitaron las cercanías de TZapotlán no sufrieron escasez. Había cuatro arroyos que descendían de la Montaña Oriente, el de Chuluapan, el de los Guayabos (que dividió a Tzapotlan en dos barrios), el de Tochtona y el del Pastor. Las aguas que bajaban por estos arroyos eran abundantes....

...En la época colonial no había tala inmoderada y por tanto el vaso de la Laguna era más extenso, puesto que su ribera oriente en gran parte entraba al cuadro de lo que era entonces el pueblo. También de esto hay pruebas en un testimonio de Fray Alonso Ponce que data de 1585-1590, en el que menciona que a un convento entraba un <<golpe de agua grande>>. También

menciona que el pueblo de Zapotlán estaba junto a <<una buena laguna que cría mucho y muy buen pescado blanco>>...

...En 1668 hay constancia en textos de que el lago se secó y que a razón de eso el ganado estaba muriendo. También se infiere que en esas tierras abajo del monolito <<los Compadres>> hay un acueducto por el que corría agua para lavar el metal, por lo que se asegura que durante los trabajos de minería hubo agua abundante...

...En 1895 el Ayuntamiento convocó a una junta para estudiar las mejoras que necesitaba la ciudad, separándolas en necesarias, útiles y de simple ornato. El problema del agua salió a relucir como un problema al que se debía de dar solución urgentemente. Se hizo hincapié en una obra que introdujera agua desde los manantiales <<La Hierbabuena>> y <<El Lodo>>, limpiando primeramente los manantiales y construyendo una presa. La obra se valuó en doce mil pesos. En febrero de 1897 quedaron terminados lo trabajos de entubación de los manantiales, desde la montaña Oriente hasta la fuente de la Plaza de Armas...

...En abril de 1898 el Ayuntamiento compró y mandó instalar un molino de viento en el Jardín 5 de mayo, que bombeaba agua para regar o para uso doméstico. Esta obra despareció con el pretexto de modernizar...

...En 1899 fue presentado y aprobado por el Supremo Gobierno del Estado, un proyecto sobre las obras de la Laguna de Zapotlán el Grande. El proyecto constaba de:

1. *Un túnel para la conducción de las aguas sobrantes de la Laguna de Huescalapa.*
2. *Un túnel de la Hacienda de la Cofradía a la Barranca de la Tinaja del Muerto rumbo a Sayula.*
3. *Construcción de tres presas en la Sierra de la Tigresa, para separar la cantidad suficiente de agua a poder disponer. Esta agua después de producir fuerza motriz, se utilizaría para el riego.*
4. *Construcción en la Laguna de una canal central, varios transversales y uno de circunvalación, que deberían estar llenos de agua para el consumo público.*
5. *Se llevarían a cabo en las Sierras del Tigre y San Andrés, obras hidráulicas, de perforación, diques y desvíos, para obtener la mayor cantidad de agua disponible.*

...En noviembre de 1901 se iniciaron formalmente los trabajos de dicha obra, pero para abril de ese mismo año la obra se suspendió por la muerte de Martín Fonts, autor del proyecto....

...El agua es necesaria para todos ya que significa salud, vida y dinero; pero para que caiga en nuestras ciudades o campos, se necesitan los árboles que atraigan las lluvias. Aún así se talan nuestros bosques y se seca nuestra laguna, a cambio de unas monedas....

...En agosto de 1902, cuando más era necesaria para los campos del Valle, sobrevino una escasa temporada de lluvias. Pero después, según crónicas publicadas tras imploración al Patrono San José, hubo lluvia en abundancia...

...Tiempo después que el agua empezó escasear, hubieron medidas para intentar reponerla, pero todo proyecto quedó en suspenso a causa de la Constitución, a menos hasta que entró a su fase constitucional. En 1919, se formó el grupo <<Melchor Ocampo>> quienes aprovecharon la candidatura de Álvaro Obregón para obtener apoyo para dirigir el agua del manantial de la Catarina, hacia Zapotlán...

...Y gracias al presidente Obregón y la Suprema Corte de Justicia, se aceptó el trasladar el agua desde la Hacienda de la Catarina. Para la construcción del acueducto que debería

transportar el agua se creó la Junta Proveedora de Aguas. En las sesiones celebradas por esta junta se hicieron notar las buenas intenciones de los zapotlenses de terminar el acueducto. Por desgracia, esto no fue suficiente para resolver el problema del agua, ya que en 1939 hubo una nueva escasez de agua lo que llevó a que en 1940 se renovara toda la red...

...Para esto se formó una nueva Junta Abastecedora de Agua, que se vio respaldada económicamente por el pueblo...

...El 15 de abril de 1941, la ciudad se vio sacudida por un terremoto lo que causó muchas desgracias a este y a otros pueblos circunvecinos. Por esta causa, el Presidente de la República fue a impartir ayuda a los damnificados y aprovechando esto, la Junta Abastecedora le recordó el problema del agua. El Presidente ofreció ayuda del Gobierno Federal y mandó a un ingeniero para que analizara el lugar y la obra...

...Tras esto surgió la posibilidad en Zapotlán de obtener agua a partir de la perforación de pozos, pero para esto se necesitaba la suficiente energía eléctrica. Para esto se construyó una presa en Piedras Negras, cerca de San Gregorio...

...Los trabajos habían sido suspendidos temporalmente por la [Segunda] *Guerra Mundial, pero el viernes 3 de julio de 1942, se iniciaron los trabajos de construcción de los tanques de almacenamiento, los cuales se pusieron en servicio el 29 de agosto de 1943...*

...Durante octubre de 1943, se puso a consideración del pueblo que se dotara a la ciudad de alcantarillado y drenaje. El viernes 28 de abril de 1944 el Presidente Municipal juzgó necesario inspeccionar el acueducto de "La Yerbabuena" y encontraron que el agua se estaba desperdiciando, por lo que se mandaron realizar obras de reparación a dicho acueducto...

...El lunes 19 de febrero de 1945 se iniciaron los trabajos de alcantarillado, y se suspendieron por un tiempo, pero el 14 de mayo de ese año se reiniciaron las obras. Además de la nueva red esta empresa requería de la perforación de pozos...

...El jueves 26 de diciembre de 1946 se inició la perforación del primer pozo. Al finalizar enero de 1947, se supo que el pozo tenía una profundidad de 125 metros. En los últimos días de junio de 1947, los agricultores estaban preocupados porque aunque estaban en temporada de lluvias, el agua no caía en sus terrenos, esto a causa de la tala de la Industrial Atenquique, por lo que se le aconsejó que no sólo talara sino que reforestara lo talado. El pueblo estaba cansado de ver tantas promesas, e incluso después se daría a conocer que ni los pozos ni las obras suspendidas serían suficientes para mejorar el servicio del agua. Entonces se vio la posibilidad de una presa que detenga la corriente de "los Guayabos", aún así el mal servicio y la inconformidad que conlleva continuaron...

...El 14 de marzo de 1949, el contratista de la obra exigió la cantidad de $160,000 adicionales a los dos millones que ya debía el pueblo. Esto causó discusiones, y se observó que las postergaciones a la obra sólo habían servido para aumentar el aumento de costo. Así, con la llegada de Alfonso Moreno Vera a la presidencia municipal, también llegó la intención de pedir más dinero al pueblo. A esto se negaron los regidores que hablaron con franqueza con Moreno Vera y defendieron los intereses del pueblo, juzgando al nuevo contrato de la red como indebido. Comentarios aparecieron en la prensa sobre las promesas incumplidas durante tanto tiempo y estas hicieron reaccionar al presidente y al gobernador que el 29 de abril de 1949 intervinieron para arreglar ciertas cosas que entorpecían la construcción de la red, y tras tres años de espera y promesas, por fin el 5 de mayo de ese año los zapontlenses recibieron agua en sus casas...

...Aún así, el aumento de la población impidió la adecuada repartición de agua. En 1956, hubo una época de estiaje y para ello se organizó una nueva obra dirigida por el Ing. Vargas para abrir nuevos pozos y así aumentar el agua del manantial...

…Otra obra estaba en consideración, una obra que el Consejo de Urbanización consideró necesaria para la implementación de alcantarillado, drenaje y calles pavimentadas. Los trabajos empezaron el 24 de junio de 1957…

…Aún con todo, el proyecto de Ing. Vargas no se llevó a cabo, y dicho ingeniero insistió en que la única manera de obtener agua era traer agua de algún lado y el Río de Cobianes era una opción factible. Así se lo propuso al gobierno en un texto <<Exposición de posibilidades de aprovechamiento de acuíferos para beneficio de la población y zona agrícola de Ciudad Guzmán, Jalisco>>…".

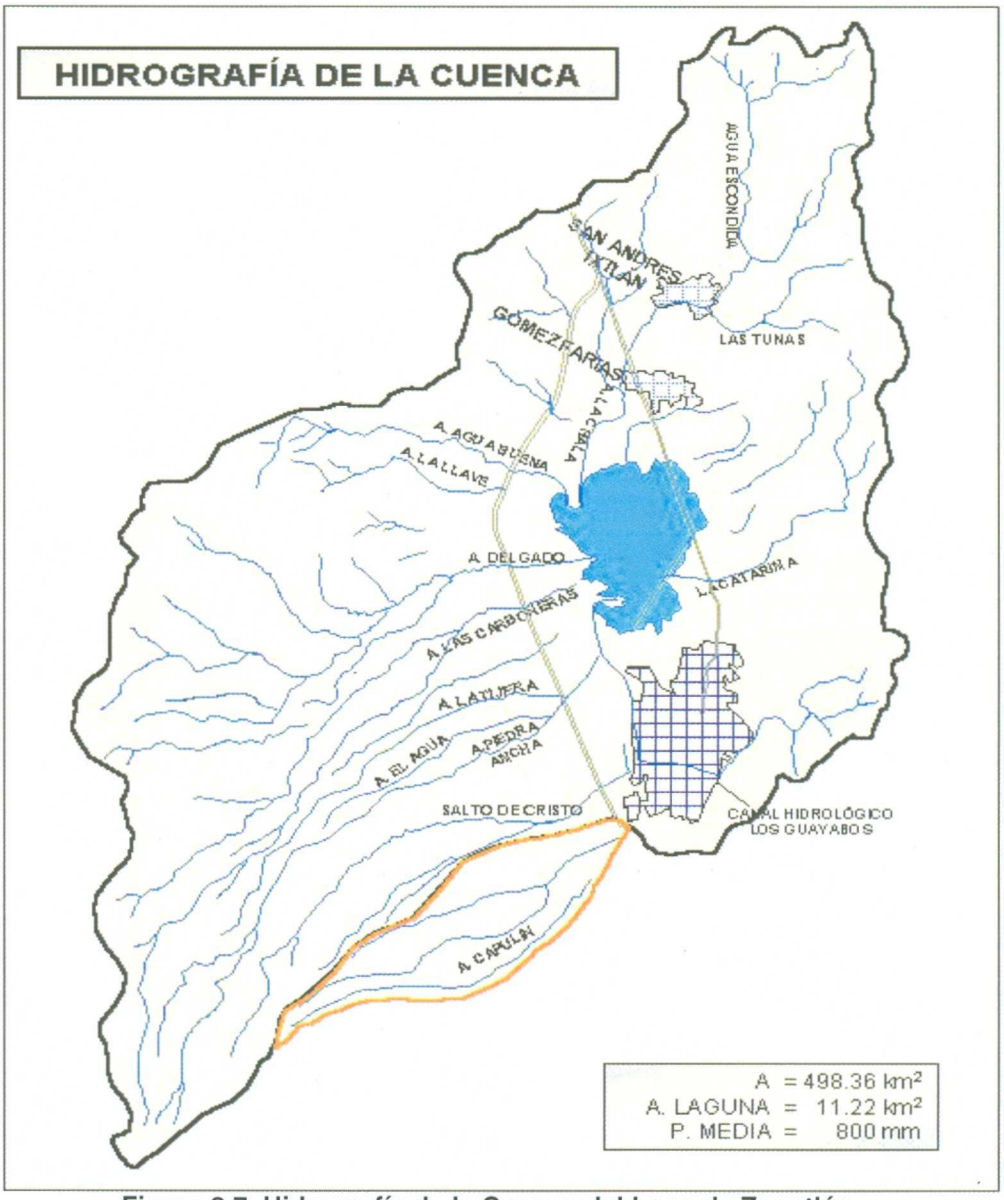

Figura 2.7. Hidrografía de la Cuenca del Lago de Zapotlán.
(Tomada del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

De acuerdo con el texto anterior, puede apreciarse que la hidrología superficial de la cuenca se ha modificado a lo largo de los años. Llama la atención que incluso se haya secado el Lago de Zapotlán, probablemente por algún movimiento tectónico, aunque no haya constancia de ello en la cronología exhaustiva de los sismos ocurridos en Ciudad Guzmán entre los años de 1543 y 1985 hecha por García de Alba, R. (1988).

Tabla 2.4. Arroyos que Desembocan en el Lago de Zapotlán.

Subcuenca	Punto de entrada al Lago de Zapotlán	Origen	Arroyos (el cauce principal se indica en caracteres cursivos)	Longitud del cauce principal *(km)*
San Andrés	Norte del lago	Sierra *Los Manzanillos*	Los Manzanillos	15
			El Jaralillo	
			Agua Escondida	
			San Andrés-La Chala	
Agua Buena	Noroeste del lago	Cerros: *El Taciste, La Nopalera,* y *Los Charcos*	*Agua Buena*	12
Arroyo Delgado	Oeste del lago	Cerros: *Los Charcos, El Meco* y *Media Luna*	Hondo	16
			Peña Blanca	
			Rincón de Vigas	
			Los Manzanitos	
			La Tabaquera	
			Los Charcos	
			Atequizayan	
			Delgado	
Carboneras	Sudoeste del lago	Límite occidental de la cuenca	El Limón	17
			El Cajón	
			Mendoza	
			El Salto	
			Las Carboneras	
La Tijera-Salto de Cristo	Sudoeste del lago	Volcán *Nevado de Colima* y el *Pico del Águila*	La Tijera	18
			El Agua	
			Piedra Ancha	
			Salto de Cristo	
		Sureste de Ciudad Guzmán	El Guayabo (Canal Hidrológico de Ciudad Guzmán)	
La Catarina	Este del lago	Sierra de *El Tigre*	*La Catarina*	No disponible

La hidrografía actual de la cuenca puede apreciarse en la Figura 2.7. en la página anterior. Asimismo, la Tabla 2.4. en esta página contiene los arroyos que desembocan en el Lago de Zapotlán organizados según subcuencas, de acuerdo con el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003). Existen otros

arroyos en la cuenca, pero éstos se disipan antes de llegar al vaso lacustre, por lo que no desembocan propiamente en la laguna. Algunos de estos arroyos son: *La Llave*, *El Capulín*, *Las Tunas*, *Agua Escondida*, *Piedras Negras*, y las corrientes de los Cerros *Grande* y *El Guaje*. Nótese que en la Tabla 2.3., los cauces principales de cada subcuenca se encuentran escritos en caracteres cursivos.

Cabe señalar que los arroyos y cauces que existen en la Cuenca de Zapotlán son de carácter temporal, permitiendo el desagüe del agua de lluvia hacia el Lago de Zapotlán. Asimismo, las crecidas de los cauces de los arroyos *Chuluapan* y *El Guayabo* son las que más afectan a Ciudad Guzmán en su paso hacia el Lago de Zapotlán (García de Alba, R., 1988).

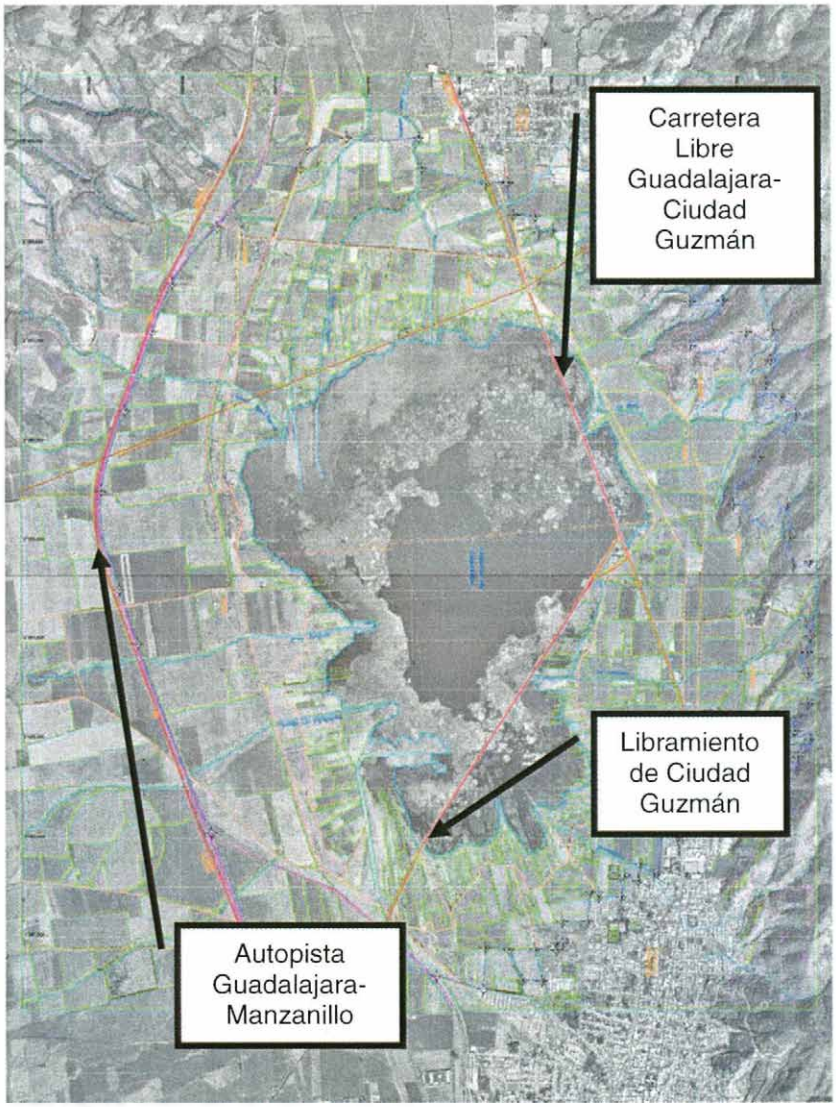

Figura 2.8. Ejes Carreteros Próximos al Lago de Zapotlán -Fotografía Aérea-. (Tomada del *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna,* 2002).

En la página anterior, la Figura 2.8. muestra una fotografía aérea tomada del *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002), en la cual se han resaltado los ejes carreteros próximos al lago. En la Figura 2.8., puede observarse que el Lago de Zapotlán es atravesado por dos ejes carreteros: en la porción oriente del lago se encuentra la carretera libre Guadalajara-Ciudad Guzmán en dirección NO-SE, mientras que en la porción sur el lago es cruzado por el libramiento a Ciudad Guzmán en dirección SO-NE. Estas vialidades dividen al Lago de Zapotlán en cuando menos tres grandes y diferentes subsistemas con distinto comportamiento hidráulico.

2.7.8. Batimetría del lago

Hasta antes del año 2003, la batimetría detallada del Lago de Zapotlán era desconocida. A manera de aproximación, se estimaba el volumen del lago en veinte millones de metros cúbicos ($20x10^6m^3$), con una profundidad media entre 1.5m y 2.6m, y un área superficial de 1,248.39ha (*Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna*, 2002).

De esta forma, la batimetría del Lago de Zapotlán era inferida a partir de conjeturas generales y testimonios de pescadores. Intuitivamente, la batimetría del lago era asumida según la configuración preliminar indicada en la Figura 2.9.

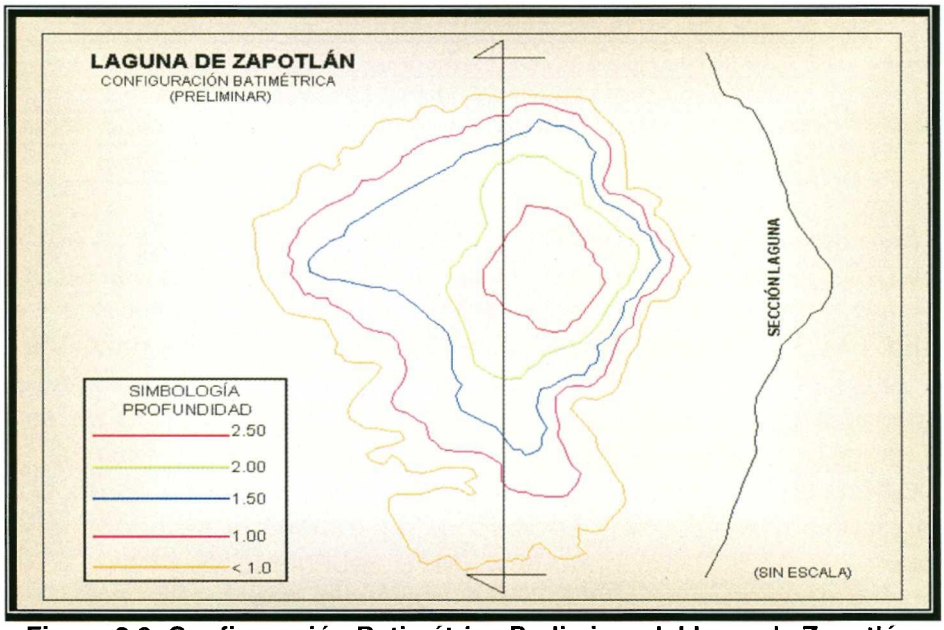

Figura 2.9. Configuración Batimétrica Preliminar del Lago de Zapotlán. (Tomado del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

No obstante, durante el mes de abril de 2003, CEAS llevó a cabo el estudio de batimetría definitiva (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003) que ha servido de sustento teórico para la realización de esta tesis.

A continuación, pueden verse en la Tabla 2.5. los resultados de la batimetría definitiva para el Lago de Zapotlán, donde *H* es la *profundidad máxima del lago* cuando la superficie del espejo de agua alcanza la cota correspondiente, A_{sup} es el área del espejo de agua, y *V* es el volumen almacenado hasta la superficie del lago.

Tabla 2.5. Levantamiento Batimétrico del Lago de Zapotlán.
(Fuente: *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

Levantamiento Batimétrico de Abril de 2003				
Altitud de la Superficie	H	A_{sup}		V
(msnm)	*(m)*	*(ha)*	*(m^2)*	*(m^3)*
1,493.25	0.00	0.41	4,114.02	---
1,493.50	0.25	5.45	54,525.22	7,329.91
1,493.75	0.50	49.42	494,244.61	84,157.68
1,494.00	0.75	95.23	952,328.85	243,280.76
1,494.25	1.00	148.51	1,485,116.20	547,961.39
1,494.50	1.25	223.32	2,233,211.48	1,012,752.35
1,494.75	1.50	298.11	2,981,062.42	1,664,536.59
1,495.00	1.75	340.57	3,405,737.26	2,462,886.55
1,495.25	2.00	388.74	3,887,444.83	3,374,534.31
1,495.50	2.25	428.44	4,284,448.43	4,396,020.97
1,495.75	2.50	465.30	4,653,043.31	5,513,207.44
1,496.00	2.75	586.95	5,869,456.47	6,828,519.91
1,496.25	3.00	700.33	7,003,253.45	8,437,608.65
1,496.50	3.25	778.15	7,781,480.52	10,285,700.39
1,496.75	3.50	905.68	9,056,831.63	12,390,489.41
1,497.00	3.75	1,038.71	10,387,126.07	14,820,984.12
1,497.25	4.00	1,138.66	11,386,615.45	17,542,701.81
1,497.50	4.25	1,210.47	12,104,694.73	20,479,115.59
1,497.75	4.50	1,285.58	12,855,844.90	23,599,183.04
1,498.00	4.75	1,340.90	13,409,042.68	26,882,293.99

De acuerdo con la Tabla 2.5., en cuanto al área superficial y volumen del lago, los datos de la curva correspondiente a la cota 1,497.50msnm (1,210.47ha y $20.5 \times 10^6 m^3$) son los valores más similares a las generalizaciones del *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002) (1,248.39ha y $20 \times 10^6 m^3$, respectivamente). La profundidad no se comparó, pues la Tabla 2.5. presenta datos de profundidad máxima. En la página siguiente se presenta la Figura 2.10, la cual muestra un detalle adaptado del *Plano General de Topobatimetría de la Laguna de Zapotlán* (originalmente en escala 1:10,000), cuyo origen horizontal se encuentra en el Sistema Geodésico Nacional en el Datum ITRF92 Zona 13 (coordenadas UTM), y el origen vertical en el banco de nivel del INEGI No. 131-4 con elevación 1,355.3250msnm ubicado sobre la

carretera Federal No. 54 Sayula-Zapotlán el Grande, aproximadamente a 17km del Lago de Zapotlán (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

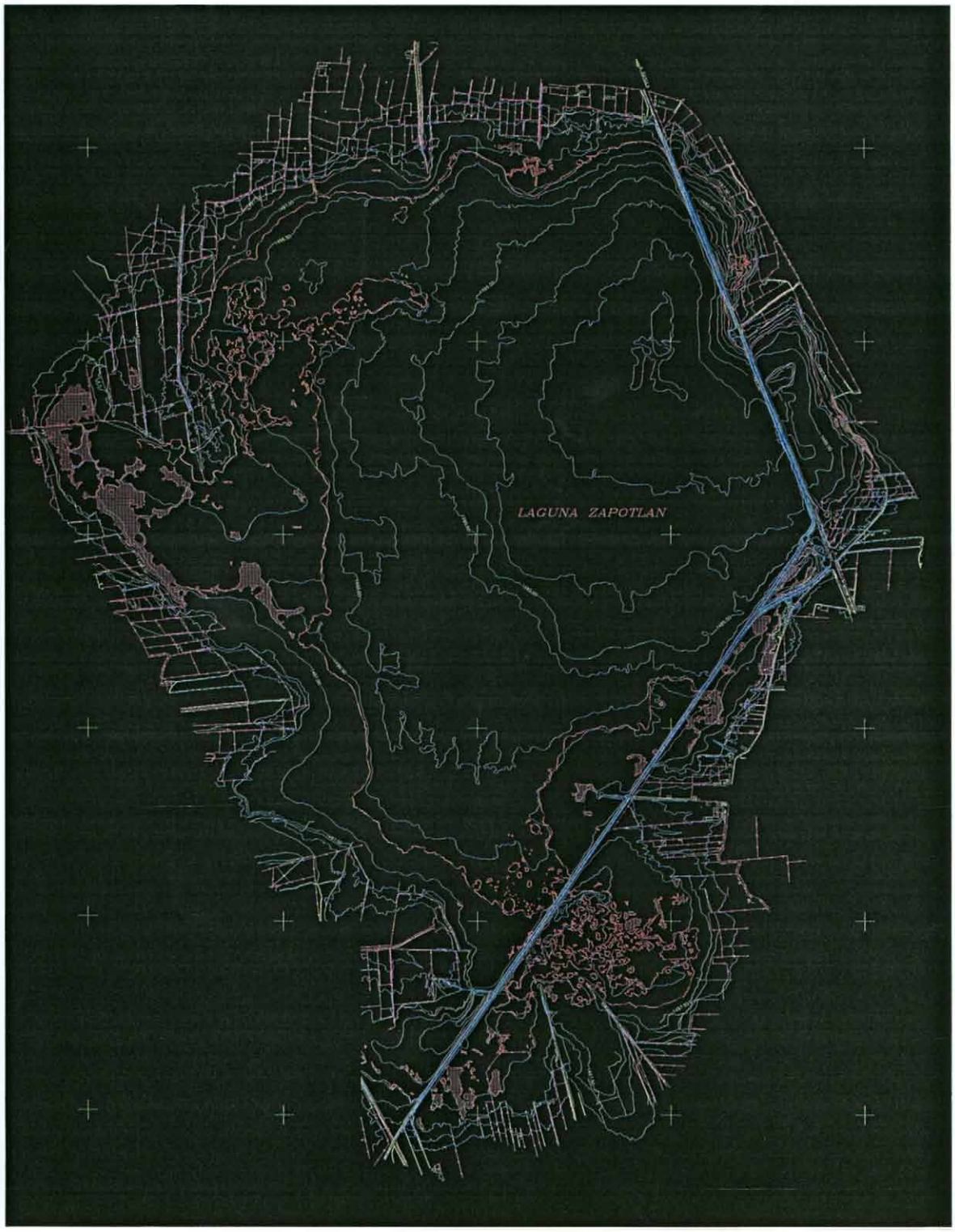

Figura 2.10. Detalle del *Plano General de Topobatimetría de la Laguna de Zapotlán*. (Adaptado del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

En la Figura 2.10., las curvas en color blanco corresponden a las curvas batimétricas maestras a 1,495.00msnm y 1,497.50msnm. Por otra parte, las curvas batimétricas ordinarias se indican en color azul, con una separación entre curvas cada 0.50m de altitud (o profundidad).[4] Por otra parte, las áreas en rojo corresponden con aquellas en las que hay tule visible por encima de la superficie del lago.

2.7.9. Población de la cuenca

La población de la Cuenca del Lago de Zapotlán puede considerarse distribuida en su totalidad entre los municipios de *Zapotlán el Grande* y de *Gómez Farías* y clasificarse a su vez como urbana o rural. En ambos municipios, además de algunas localidades de dos o más viviendas, se consideró su composición por localidades de acuerdo a las Tablas 2.6. y 2.7.

Tabla 2.6. Localidades del Municipio de *Gómez Farías*.
(Adaptada del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

Nombre de la Localidad	Localización		
	Longitud Oeste	Latitud Norte	Altitud *(msnm)*
San Sebastián del Sur	103°28'38"	19°47'39"	1,510
Cofradía del Rosario	103°30'11"	19°46'59"	1,500
Durazno, El	103°19'29"	19°51'46"	1,950
Rodeo, El	103°26'10"	19°50'19"	2,000
Ejido Uno de Febrero	103°29'29"	19°48'50"	1,515
Granja Sin Nombre	103°29'49"	19°46'05"	1,490
San Andrés Ixtlán 1	103°28'10"	19°49'11"	1,520
San Andrés Ixtlán 2	103°28'54"	19°49'04"	1,520
San Andrés Ixtlán 3	103°28'09"	19°48'37"	1,520
San Andrés Ixtlán 4	103°27'55"	19°48'38"	1,520

En las Tablas 2.6. y 2.7., los nombres de las cabeceras municipales se encuentran escritos en caracteres cursivos. En el caso del municipio de *Gómez Farías*, se estima que poco más del 51% de la población del municipio se encuentra en San Sebastián del Sur, mientras que en el caso del municipio de *Zapotlán el Grande*, se estima que el porcentaje de la población municipal concentrada en Ciudad Guzmán es de casi el 99% (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

[4] Las curvas batimétricas maestras y ordinarias describen la fisiografía del *fondo* del vaso lacustre (véase la Figura 2.10.).

Finalmente, la Tabla 2.8. contiene las proyecciones de población de la cuenca hechas por CEAS para el período comprendido entre los años 2000 y 2020 con base a los datos del XII Censo de Población y Vivienda llevado a cabo por el INEGI en el año 2000 (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

Tabla 2.7. Localidades del Municipio de *Zapotlán el Grande*. (Adaptada del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003.)

Nombre de la Localidad	Localización		
	Longitud Oeste	Latitud Norte	Altitud *(msnm)*
Ciudad Guzmán	103°27'45"	19°42'10"	1,520
Atequizayan	103°34'27"	19°42'33"	1,680
Depósitos, Los	103°32'44"	19°38'48"	1,810
Ojo de agua, El	103°26'47"	19°44'42"	1,580
Fortuna, La	103°27'26"	19°46'00"	1,540
Recreo, El	103°27'19"	19°45'23"	1,530
Puerta de Cadenas	103°28'39"	19°40'21"	1,540
Rancho La Curva	103°27'31"	19°44'28"	1,515
Campanario, El	103°27'21"	19°41'00"	1,600
Agro González	103°28'32"	19°39'24"	1,560
Calvario, El	103°29'57"	19°41'51"	1,540
Chirimoyo, El	103°30'42"	19°41'22"	1,570
Club Deportivo Campesinos	103°28'48"	19°40'24"	1,520
Crucero del Fresnito	103°31'24"	19°37'27"	1,740
Granja el Oasis	103°29'25"	19°41'12"	1,530
Granja los Camichines	103°31'38"	19°43'06"	1,560
Llave Uno, La	103°31'37"	19°45'31"	1,520
Laurel, El	103°25'19"	19°43'46"	1,960
Maderera Zapotlán de Orozco	103°28'45"	19°39'30"	1,560
Mexicana Central de Madera	103°29'38"	19°39'23"	1,560
Palos Altos	103°27'54"	19°43'48"	1,510
Pastor de Arriba	103°27'30"	19°40'56"	1,620
Colonia del Fresno	103°29'09"	19°40'56"	1,520
Polvorín, El	103°29'59"	19°42'38"	1,520
Rancho de Don Luis Martínez	103°27'36"	19°40'43"	1,580
Rancho el Estribo	103°29'57"	19°40'45"	1,540
Rancho el Nogal	103°27'10"	19°44'30"	1,520
Rancho la Estrella	103°29'40"	19°43'26"	1,500
Rancho San Martín	103°27'30"	19°44'02"	1,500
Rancho Sin Nombre 1	103°30'59"	19°43'03"	1,540
Rancho Sin Nombre 2	103°27'58"	19°43'24"	1,500
Rancho Sin Nombre 3	103°27'21"	19°44'01"	1,520
Rancho Sin Nombre 4	103°27'15"	19°44'10"	1,520
San José	103°30'10"	19°44'55"	1,500
San Rafael	103°29'20"	19°41'28"	1,520
S. A. P. A. C. G.	103°28'55"	19°42'50"	1,510
Solanes, Los	103°24'30"	19°44'07"	1,940
Tabla larga	103°29'48"	19°42'59"	1,510
Aguacatera, La	103°26'36"	19°41'06"	1,890

Tabla 2.8. Proyecciones de Población de la Cuenca de Zapotlán en el Período 2000-2020.

Año	2000		2001		2002		2003	
Tipo de población	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Zapotlán el Grande	86,149	1,656	87,205	1,691	88,207	1,724	89,152	1,757
Gómez Farías	11,043	1,744	11,093	1,766	11,138	1,787	11,177	1,808
Total de la Cuenca	*97,192*	*3,400*	*98,298*	*3,457*	*99,345*	*3,511*	*100,329*	*3,565*
	100,592		***101,755***		***102,856***		***103,894***	
Año	2005		2010		2015		2020	
Tipo de población	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural
Zapotlán el Grande	90,868	1,817	94,681	1,908	97,682	1,968	99,999	2,014
Gómez Farías	11,242	1,846	11,382	1,883	11,470	1,898	11,515	1,906
Total de la Cuenca	*102,110*	*3,663*	*106,063*	*3,791*	*109,152*	*3,866*	*111,514*	*3,920*
	105,773		***109,854***		***113,018***		***115,434***	

Así, en la Tabla 2.8. puede verse que la población de la cuenca es superior a los 100,000 habitantes, y que en período 2000-2020 se espera un incremento total de aproximadamente el 14.75%.

Finalmente, de acuerdo con los valores de la Tabla 2.8., para el año de terminación de este trabajo de tesis (2004), puede esperarse una población promedio de aproximadamente 104,834 habitantes en la cuenca, de los cuales se espera que unas 101,220 personas se consideren como población urbana.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se hace una descripción general de la metodología bajo la cual se desarrolló la investigación propia de esta tesis. Antes de presentar las hipótesis que guiaron esta investigación, así como los materiales y métodos de la misma, se hace a continuación un recuento de las siete fases generales del trabajo llevado a cabo en este proyecto de tesis de maestría:

Fase I: Inicio

La fase de inicio del proyecto se refiere al arranque del mismo, contemplando la definición del problema y objetivos de la investigación, así como la identificación y revisión de la literatura, junto con el inicio de la construcción del marco teórico. Esta fase dio inicio en enero de 2003 y terminó en abril del mismo año.

Fase II: Redacción de la Propuesta de Investigación

Esta segunda fase dio inicio con la planeación y estructuración de la investigación formal dentro del trabajo de tesis. Asimismo, esta fase comprendió la redacción de una primera versión de la propuesta de investigación, presentada en mayo de 2003, y los ajustes necesarios para llegar a la versión final alcanzada en septiembre de 2003, bajo la cual se desarrolló esta tesis.

Fase III: Monitoreos de Calidad del Agua del Lago de Zapotlán

En esta fase se procedió a hacer el *muestreo de las estaciones lacustres del lago* y el *muestreo de las descargas directas de aguas residuales de los municipios de Ciudad Guzmán y Gómez Farías*. Para cumplir con estos dos pasos, para cada uno fue necesario definir los parámetros de calidad del agua a monitorear, así como los puntos de muestreo. Tras haber efectuado el monitoreo, fue necesario analizar las muestras de agua en los laboratorios del CIATEJ. Esta fase se desarrolló paralelamente a la fase anterior, comenzando en abril de 2003, y siendo completada en septiembre del mismo año, habiendo conseguido dos monitoreos de calidad del agua, uno para la época de estiaje (en mayo) y otro para la de lluvias (septiembre) de dicho año.

Fase IV: Primera Etapa de Ejecución

En esta fase dio comienzo la ejecución del trabajo de investigación propiamente dicho, utilizando la información disponible para la adaptación de un conjunto de expresiones matemáticas con las cuales se modeló la eutroficación del Lago de Zapotlán mediante la aplicación de métodos numéricos para la solución de Sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias. Para ello, se realizó la revisión de modelos matemáticos generales de eutroficación, para luego proceder al desarrollo de modelos particulares de eutroficación del Lago de Zapotlán. Esta fase concluyó en diciembre de 2003.

Fase V: Segunda Etapa de Ejecución

El siguiente paso fue la *Construcción del proyecto en RAISON™*, cuya ejecución dependió de las siguientes actividades para integrar el SIG: dar de alta el programa, autocapacitación en el uso del sistema, digitalización de la línea del litoral del lago, dar de alta el proyecto, geo-referenciar sitios, dar de alta los sitios, preparar la base de datos, dar de alta la base de datos, hacer pruebas de funcionalidad, someter el proyecto a verificación y aprobación para luego analizar resultados de monitoreo en el SIG, definir alcances del análisis y obtener los mapas bidimensionales de calidad de agua en *RAISON™*. A partir de dichos mapas, fue necesario hacer la comparación de los resultados interpolados por un lado, con normas de calidad del agua por el otro, para así detectar los parámetros con mayor desviación, y reportar resultados en mapas bidimensionales. Esta segunda fase de la investigación concluyó en febrero de 2004.

Fase VI: Cierre de la Investigación

Esta fase consistió en el tratamiento de los resultados de las fases de ejecución anteriores a fin de encauzar los resultados hacia el control de la eutroficación del Lago de Zapotlán. Posteriormente, se hizo la revisión de técnicas disponibles para el control de la eutroficación, a fin de elegir finalmente mecanismos y técnicas de control de eutroficación para el Lago de Zapotlán. Esta fase concluyó en marzo de 2004.

Fase VII: Presentación de avances y reporte de tesis

La última fase fue la *Presentación de avances y reporte de tesis*, para lo cual se hizo una presentación de avances ante el asesor y sinodales en el mes de octubre de 2003, así como la defensa de tesis durante el mes de abril de 2004. La redacción del reporte de tesis se hizo en forma simultánea, alcanzándose su versión final durante el mes de abril de 2004.

3.1. Hipótesis de investigación

A fin de alcanzar los objetivos de la investigación anteriormente descritos en la Sección 1.3. del Capítulo 1, es necesario considerar las siguientes preguntas generales:

- Dada la profundidad del Lago de Zapotlán, ¿es suficiente la simulación bidimensional de su calidad del agua para describir el proceso de eutroficación al cual está sometido el vaso lacustre?
- ¿Cómo pueden identificarse posibles relaciones entre los parámetros de calidad del agua del Lago de Zapotlán?

- ¿Puede modelarse matemáticamente la eutroficación del Lago de Zapotlán?
- ¿Puede controlarse la eutroficación en el Lago de Zapotlán?

Así, a lo largo del trabajo de investigación, se buscó probar a las siguientes hipótesis:

1. Es válido suponer que la simulación bidimensional de la calidad del agua del Lago de Zapotlán es suficiente para describir el proceso de eutroficación al que está sometido el lago.
2. La interpretación crítica de los resultados de las modelaciones matemáticas y simulaciones computarizadas de los sistemas de calidad del agua del Lago de Zapotlán, así como análisis estadísticos de éstos, permitirá reconocer aquellos parámetros para los cuales exista correlación entre sus niveles de concentración.
3. Es posible aproximar soluciones numéricas de modelos matemáticos de eutroficación en el vaso lacustre de la Cuenca del Lago de Zapotlán.
4. Es posible recomendar y reconocer estrategias válidas para el control de la eutroficación adecuadas para el caso del Lago de Zapotlán, en función de los resultados de acuerdo a un modelo de calidad del agua.

3.2. Materiales y métodos

En esta sección se describen los métodos seguidos para obtener los resultados de la investigación, a partir del balance hidrológico del Lago de Zapotlán, los monitoreos de la calidad del agua del lago, la construcción del SIG del Lago de Zapotlán, el uso de RAISON™ y la modelación de la eutroficación en dicho cuerpo lacustre.

3.2.1. Modelación y balance hidrológico del Lago de Zapotlán

A fin de comprender el funcionamiento del vaso lacustre de Zapotlán, se partió del estudio de batimetría realizado por CEAS (consúltese la Sección 2.7.8. del Capítulo 2 de esta tesis), con el objeto de desarrollar un modelo morfométrico del Lago de Zapotlán.

Para ello, se partió del razonamiento indicado por de Anda, J., Quiñones-Cisneros, S. E., French, R. & Guzmán, M. (1998), según el cual si se considera inicialmente al lago ya sea como una pirámide invertida o un prisma rectangular, entonces su volumen V y área superficial A_{sup} pueden aproximarse proporcionalmente a las potencias cúbica ($x=3$) y cuadrada ($y=2$) de su profundidad máxima H, respectivamente.

$$V \propto H^x \tag{3.1}$$

$$A_{\sup} \propto H^y \tag{3.2}$$

Así, a partir de las Expresiones (3.1) y (3.2), se consideró que:

$$\frac{V}{A_{\sup}} \propto H^n \tag{3.3}$$

donde el superíndice n equivale teóricamente a la unidad para el caso de geometrías regulares, es decir a la diferencia x-y. Sin embargo, para geometrías más complejas (como las encontradas en la naturaleza), el modelo anterior puede aproximarse razonablemente para distintos valores de n, junto con valores específicos de proporcionalidad, indicados por la letra k en la siguiente expresión:

$$\frac{V}{A_{\sup}} = kH^n \tag{3.4}$$

donde a la relación de V/A_{sup} se le denominó profundidad media del lago, $\hat{H}$.

De tal forma, para trabajar con los datos de batimetría del Lago de Zapotlán (consúltese la Sección 2.7.8. en el capítulo anterior), éstos se ajustaron por medio de mínimos cuadrados a la linealización de la Ecuación (3.4) mediante el empleo de logaritmos naturales:

$$\ln\left(\frac{V}{A_{\sup}}\right) = \ln k + n \ln H \tag{3.5}$$

Recuérdese que en el Capítulo 2, H se definió como la profundidad máxima del lago cuando la superficie del espejo de agua alcanzase la altitud cota correspondiente, y que por tanto equivale a la diferencia entre la altitud de la cota dada la superficie del lago h_s y la cota correspondiente al nivel mínimo del lago h_m, es decir:

$$H = h_s - h_m \tag{3.6}$$

donde el valor sugerido de h_m para el Lago de Zapotlán es 1,493.25msnm de acuerdo con la Tabla 2.5. del Capítulo 2.

Los resultados del ajuste al modelo de la Ecuación (3.4) se detallan en la Sección 4.1. del próximo capítulo de esta tesis.

De tal forma, además del ajuste al modelo morfométrico expresado por las Ecuaciones (3.4) y (3.5), se llevaron a cabo regresiones polinomiales para expresar tanto al volumen como al área superficial en función de la profundidad máxima del lago, así como al volumen en función del área superficial y viceversa, es decir:

$$V = f(H) \tag{3.7}$$

$$A_{\sup} = g(H) \tag{3.8}$$

$$V = \phi(A_{\sup}) \tag{3.9}$$

$$A_{\sup} = \gamma(V) \tag{3.10}$$

En las Ecuaciones (3.7) a (3.10), las letras *f*, *g*, ϕ y γ denotan funciones polinomiales. En la selección del orden de dichas funciones polinomiales, se consideró que a medida que el orden del polinomio crece, disminuye el significado físico de los parámetros de la regresión, por lo que se prefirió emplear órdenes no superiores al tercero a fin de obtener modelo empíricos de utilidad práctica para el cálculo e interpolación de valores, pero al mismo tiempo, acorde con una curva suave de ajuste (Baird, D. C., 1991). Al igual que el ajuste al modelo de la Ecuación (3.5), los resultados de los ajustes a las regresiones polinomiales de las Ecuaciones (3.7) a (3.10) se encuentran en la Sección 4.1.

Una vez caracterizado el lago en cuanto a su geometría de acuerdo con las Ecuaciones (3.4) a (3.10), se procedió a llevar a cabo el balance hidrológico del cuerpo de agua. De esta forma, se presenta la Ecuación Hidrológica (Fetter, C. W., 2001) en su forma general para cualquier cuerpo de agua:

$$Acumulación = \sum_i (Entradas)_i - \sum_j (Salidas)_j \tag{3.11}$$

donde la acumulación es el cambio de volumen almacenado en el lago en función del tiempo *dV/dt*. Asimismo, los flujos volumétricos de entrada posibles a un lago comúnmente pueden ser: precipitación, escorrentías, corrientes superficiales tales como ríos y arroyos, descargas de aguas residuales y corrientes subterráneas tales como corrientes de infiltración y manantiales sumergidos. De la misma forma, entre las salidas posibles a un lago se encuentran corrientes superficiales como ríos, extracciones bombeadas para consumo, evaporación, evapotranspiración y exfiltraciones.

Para llevar a cabo el balance hidrológico del Lago de Zapotlán, se contó con datos fuente utilizados originalmente por CEAS en la elaboración del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003). Para el caso específico del Lago de Zapotlán, no hay ríos ni arroyos permanentes de entrada (todos son de temporal, y dependen de las escorrentías generadas en la cuenca), ni tampoco ríos o arroyos de salida. No obstante, entre la información disponible, no existieron datos para calcular o estimar flujos tales como los de infiltración / exfiltración, manantiales sumergidos, o evapotranspiración, por lo que éstos no se consideraron en el balance hidrológico del Lago de Zapotllán. Así, la Ecuación (3.11) se escribió como:

$$\frac{dV}{dt} = Q_d + Q_p + Q_{esc} - Q_{ext} - Q_{evap} \tag{3.12}$$

donde Q denota flujo volumétrico, y sus diversos subíndices tienen los significados descritos a continuación: *d* se usó para las descargas conjuntas de aguas residuales de los municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande*, *p* indica la precipitación sobre el lago, *esc* corresponde a las escorrentías de entrada al lago, *ext* se refiere a las extracciones del lago para consumo predominantemente agrícola (consúltese la Tabla 1.1. en el Capítulo 1 de esta tesis), y *evap* denota el fenómeno de evaporación en la superficie del lago.

Dado que en el límite diferencial, el incremento de una variable tiende a su diferencial, es decir, $\Delta V \rightarrow dV$ y $\Delta t \rightarrow dt$, entonces:

$$\Delta V \approx \left(Q_d + Q_p + Q_{esc} - Q_{ext} - Q_{evap}\right)\Delta t \tag{3.13}$$

donde los intervalos de volumen y tiempo corresponden a las siguientes definiciones:

$$\Delta V \equiv V - V_0 \tag{3.14}$$

$$\Delta t \equiv t - t_0 \tag{3.15}$$

donde a su vez, V_0 es el volumen inicial para el intervalo de tiempo Δt, y t_0 es el tiempo inicial considerado arbitrariamente como igual a cero.

La Ecuación (3.13) constituye el balance hidrológico del Lago de Zapotlán, cuya expresión está escrita en términos de flujos volumétricos. Recuérdese que el producto de un flujo volumétrico por el tiempo resulta en un volumen. Así, una aproximación a la Ecuación (3.13) en términos de volúmenes totales sobre una base temporal constante -indicada por un intervalo de tiempo Δt acorde a la definición (3.15)- se expresa a continuación:

$$\Delta V \approx V_d + V_p + V_{esc} - V_{ext} - V_{evap} \tag{3.16}$$

Así, el balance volumétrico del Lago de Zapotlán descrito en la Ecuación (3.16) sobre períodos definidos de tiempo, puede usarse para aproximar el balance hidrológico de la Ecuación (3.12), y explicar así el funcionamiento del vaso lacustre. Desde luego, la resolución temporal de los datos empleados para calcular dichos volúmenes influye sobre la calidad de la aproximación: entre menor sea el período de tiempo al que correspondan los datos sobre el cual se aplique la Ecuación (3.16), mejor será su aproximación a las condiciones reales del balance.

Asimismo, considérese la sustitución de la Ecuación (3.14) en (3.16):

$$V = V_0 + V_d + V_p + V_{esc} - V_{ext} - V_{evap} \tag{3.17}$$

Nótese que se hubiera obtenido una expresión idéntica a la Ecuación (3.17) de haber integrado la Ecuación (3.12) bajo la suposición de flujos volumétricos invariantes en el tiempo, pero se prefirió la explicación usada en la página anterior para resaltar el carácter de aproximación a la realidad que posee la Ecuación (3.17), así como su validez para lapsos de tiempo razonablemente cortos, pues los flujos volumétricos de la Ecuación (3.12) en la realidad no pueden considerarse estrictamente constantes.

Además de los datos de precipitación sobre la Cuenca de Zapotlán, disponibles en el Anexo A, en el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003), se encontraron datos mensuales para el período 1982-2002 de utilidad para el cálculo de los volúmenes presentados en el balance volumétrico de la Ecuación (3.16). Tales datos pueden consultarse en el Anexo B al final de esta tesis, y son datos de altitud de la superficie del espejo de agua del Lago de Zapotlán, aportaciones de las descargas de aguas residuales de los municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande* al lago, y milímetros de evaporación de agua en el lago.

En las diferentes muestras de datos contenidas en los Anexos A y B, se incluyó además un análisis de los datos, consistente en el cálculo de valores del promedio aritmético, desviación estándar muestral y coeficiente de variación[5] a fin de indicar respectivamente, una medida del valor central y dispersión de los diferentes parámetros meteorológicos o hidrométricos para cada mes del año, así como una forma de indicar comparativamente la variabilidad entre los conjuntos de datos para cada mes (Fitch, R. K., 2002).

Resta ahora explicar la metodología empleada para calcular los diferentes elementos del balance volumétrico del Lago de Zapotlán según la Ecuación (3.16). Para ello, se presenta a continuación la Tabla 3.1. a fin de referir el procedimiento descrito a continuación a los valores contenidos en ella.

[5] El coeficiente de variación es el cociente entre la desviación estándar y la media aritmética de un conjunto de datos muestrales.

Tabla 3.1. Promedios Mensuales de los Parámetros Hidrométricos para el Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002.

Mes del año	Precipitación sobre la cuenca *(mm)*	Altitud de la superficie del lago *(msnm)*	Descargas de aguas residuales sobre el lago *(m^3)*	Evaporación desde la superficie del lago *(mm)*
Enero	27.6	1,498.07	332,245	109.8
Febrero	5.1	1,497.93	332,245	136.8
Marzo	4.1	1,497.73	379,708	194.3
Abril	2.0	1,497.43	427,172	210.6
Mayo	28.9	1,497.05	474,635	198.8
Junio	141.9	1,496.77	879,307	140.3
Julio	175.0	1,497.14	703,446	113.6
Agosto	175.6	1,497.55	791,377	113.3
Septiembre	151.0	1,497.92	791,377	103.5
Octubre	75.2	1,498.21	703,446	113.8
Noviembre	19.6	1,498.28	703,446	104.5
Diciembre	6.7	1,498.22	329,879	97.7

Iniciando por los volúmenes mensuales debidos a las contribuciones de las descargas V_d, éstos se tomaron directamente de la Tabla 3.1.

Por otra parte, el cálculo del aporte mensual del volumen debido a la precipitación V_p sobre el lago, se efectuó a partir de la siguiente expresión:

$$V_p = PA_{\sup} \tag{3.18}$$

donde P es la precipitación mensual cuyos valores aparecen en la Tabla 3.1. expresados en metros (y no en milímetros tal y como aparecen en la Tabla 3.1.), y A_{sup} es, desde luego, el área superficial del lago. Cabe señalar que el cálculo del área superficial, en lugar de realizarlo mediante la expresión de la Ecuación (3.8), se optó mediante el cociente del volumen calculado por la Ecuación (3.7) entre la profundidad media (relación V/A_{sup}) calculada mediante el modelo de la Ecuación (3.4), por considerarse menor el error en este segundo procedimiento, tal y como se ilustrará en la Sección 4.1. de esta tesis.

En cuanto al cálculo del volumen mensual ingresado al lago por escorrentías superficiales V_{esc} en forma de arroyos, éste se calculó mediante la siguiente expresión:

$$V_{esc} = C_e PA_{imp} \tag{3.19}$$

donde C_e es un coeficiente de escurrimiento, y A_{imp} es el área de la cuenca que impacta hidrológicamente al Lago de Zapotlán (es decir, el área de captación cuya agua alcanza el vaso lacustre al fluir por gravedad). De acuerdo con el *Plan*

Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003), de casi 499km^2 de la cuenca, se considera que el área de impacto es de aproximadamente 425km^2 (42,500ha) debido a que algunos cauces de las subcuencas dentro de la Cuenca del Lago de Zapotlán se disipan antes de llegar al lago (véase la Sección 2.7.7.).

En cuanto al coeficiente de escurrimiento C_e, el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) señala que éste depende el parámetro ponderado de permeabilidad K, de acuerdo con:

a) Si $K \leq 0.15, \Rightarrow$

$$C_e = K \frac{P - 250}{2000} \tag{3.20}$$

b) Si $K > 0.15, \Rightarrow$

$$C_e = K \frac{P - 250}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \tag{3.21}$$

donde P es la precipitación anual en milímetros sobre el área de impacto.

La ponderación de K se hace considerando los valores del factor k de acuerdo al tipo de permeabilidad del suelo y su cobertura (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003), como se indica en la Tabla 3.2. Cabe señalar que los valores de K y de C_e se emplean para indicar que del total de precipitación recibida sobre un área de captación o de impacto, sólo una parte queda sobre la superficie del suelo en forma de escorrentía, fluyendo por gravedad hacia terrenos más bajos; asimismo, otra parte es interceptada por la vegetación del suelo (evaporándose después), y otra parte más se infiltra en el suelo (McGhee, T. J., 1999).

En la Tabla 3.2., los tipos de permeabilidad del suelo, son:

a) Tipo *A*: suelos permeables, principalmente arenosos.
b) Tipo *B*: suelos medianamente permeables, con arenas recubriendo la superficie.
c) Tipo *C*: suelos impermeables, arcillosos.

Cabe señalar que para el caso de la Cuenca de Zapotlán, la permeabilidad del suelo se considera normalmente de tipo *A* (*Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*, 2003).

La ponderación del parámetro K se llevó a cabo de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$K = \sum_i (kA_{imp,\%})_i \tag{3.22}$$

donde el subíndice i sugiere un distinto uso del suelo o cobertura diferente.

Tabla 3.2. Factor *k* en Función de la Cobertura y Permeabilidad del Suelo.
(Tomada del Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán, 2003).

Uso o cobertura del suelo	Tipo de permeabilidad		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas.	0.26	0.28	0.30
Cultivos.	0.24	0.27	0.30
Lagunar y tular.	0.00	0.00	0.00
Pastizal (porcentaje de suelo o pastoreo):			
Más del 75%	0.14	0.20	0.28
Del 50% al 75%	0.20	0.24	0.30
Menos del 50%	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Cascos y zonas con edificaciones.	0.26	0.29	0.32
Caminos incluyendo derecho de vía.	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente.	0.18	0.24	0.30

Para el caso de la Cuenca del Lago de Zapotlán, el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) señala la siguiente distribución de usos del suelo en el área de impacto al lago, indicando así un valor ponderado de $K = 0.1580$ (véase la Tabla 3.3.).

Tabla 3.3. Parámetro K Ponderado para la Cuenca del Lago de Zapotlán.
(Tomada del Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán, 2003).

Uso del suelo	Factor k	Área de impacto		Parámetro K ponderado
		(ha)	*(%)*	
Lagunar y tular	0.00	1,562	4%	0.0000
Agricultura de riego	0.24	1,658	4%	0.0096
Agricultura de temporal	0.24	17,850	42%	0.1008
Pastizal inducido	0.14	2,834	7%	0.0098
Bosque	0.07	15,491	36%	0.0252
Vegetación Secundaria (pradera)	0.18	3,105	7%	0.0126
Totales		*42,500*	*100%*	***0.1580***

Empleando el valor anterior de *K* junto con el valor de precipitación media anual (durante el período 1982-2002) de 812.7mm (véase la Sección 2.7.6.), la Ecuación (3.21) arrojó un valor para el coeficiente de escurrimiento de 0.0498 (es decir, aproximadamente el 5% de la precipitación caída sobre el área de impacto terminará en forma de escorrentía superficial hacia el Lago de Zapotlán). Este valor del coeficiente de escurrimiento es consistente con el valor sugerido por Fetter, C. W. (2001) para planicies con pendientes menores al 2% para

suelos arenosos (permeables), y es confirmado por McGhee, T. J. (1999). La condición de topografía plana es congruente con la configuración del valle de la Cuenca del Lago de Zapotlán (véase la Sección 2.7.2.).

Así, con la información de las Tablas 3.1., 3.2. y 3.3., así como las Ecuaciones (3.19) a (3.22), fue posible calcular el volumen aportado mensualmente al Lago de Zapotlán por las escorrentías superficiales (arroyos).

Por otra parte, el volumen extraído V_{ext} mensualmente del Lago de Zapotlán se tomó directamente a partir de la información contenida en el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) –véase la Tabla 3.4.-

Tabla 3.4. Extracciones Mensuales del Lago de Zapotlán.

Mes del año	Extracciones (m^3)
Enero	1,427,000
Febrero	1,342,000
Marzo	1,813,000
Abril	2,029,000
Mayo	1,820,000
Junio	800,000
Julio	368,000
Agosto	499,000
Septiembre	499,000
Octubre	623,000
Noviembre	878,000
Diciembre	1,002,000
Total	13,100,000

Se sugiere al lector que tenga presente, además, la descripción de los usos del agua extraída del Lago según la Tabla 1.1. en el Capítulo 1 de esta tesis.

En cuanto al volumen evaporado V_{evap} mensualmente desde la superficie del Lago de Zapotlán, éste se calculó de acuerdo con:

$$V_{evap} = \eta E A_{\sup} \tag{3.23}$$

donde η es un factor de eficiencia de evaporación, recomendado en 0.92 de acuerdo al *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003), E es el valor promedio de evaporación mensual de la Tabla 3.1., y A_{sup} es, desde luego, el área superficial del lago (nótese que E y A_{sup} deben expresarse en unidades consistentes, por ejemplo, m y m^2, respectivamente). Cabe señalar que al igual que en las consideraciones anteriores, el cálculo del área superficial, en lugar de realizarlo mediante la expresión de la Ecuación (3.8), se optó mediante el cociente del volumen calculado por la Ecuación (3.7) entre la profundidad media (relación V/A_{sup}) calculada mediante el modelo de la Ecuación (3.4), por

considerarse menor el error asociado a este segundo procedimiento, tal y como se ilustrará en la Sección 4.1. de esta tesis.

Por otra parte, para completar el balance volumétrico del Lago de Zapotlán, el incremento mensual de volumen ΔV en el lago se calculó sencillamente a partir de la Ecuación (3.16). Esta cantidad permitió conocer si el Lago de Zapotlán se encuentra en un régimen de pérdida o ganancia de volumen en función del tiempo.

En cuanto al volumen promedio almacenado V cada mes en el lago, éste se calculó a partir de los datos de altitud de la superficie del lago mediante las Ecuaciones (3.6) y (3.7) –consúltese además la Sección 4.1.-.

Por último, se calculó el tiempo de retención hidráulica τ_s según las salidas del Lago de Zapotlán, definido por:

$$\tau_s \equiv \frac{V}{\sum_j Q_{s,j}} \tag{3.24}$$

donde Q_s es el flujo de salida, y el subíndice j denota las diferentes salidas identificadas para el Lago de Zapotlán: evaporación y extracciones, por lo que la Ecuación (3.24) se expresó como:

$$\tau_s = \frac{V}{Q_{evap} + Q_{ext}} \tag{3.25}$$

Dado que un flujo volumétrico es un cociente de un volumen durante un tiempo de flujo t, la Ecuación (3.25) se expresó en una forma más conveniente dados los datos disponibles en la Tabla 3.4. y la Ecuación (3.23):

$$\tau_s = t\left(\frac{V}{V_{evap} + V_{ext}}\right) \tag{3.26}$$

donde t es igual al número de días en un mes (por lo que τ_s se expresa en días), dado que t es en efecto el tiempo de flujo y los volúmenes de evaporación y extracción se consideraron sobre una base de cálculo mensual.

Análogamente, se expresó el tiempo de retención hidráulica τ_e según las entradas al Lago de Zapotlán:

$$\tau_e = t\left(\frac{V}{V_d + V_{esc} + V_p}\right) \tag{3.27}$$

Físicamente, τ_s es el tiempo promedio en que tarda en salir el agua del vaso lacustre, mientras que τ_e es el tiempo promedio en que tarda en remplazarse un volumen equivalente al contenido en el lago (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989).

3.2.2. Monitoreos de calidad del agua

A fin de construir un SIG el cual relacione información de contaminación del agua con coordenadas espaciales dentro del Lago de Zapotlán, fue necesario generar datos de calidad del agua en diversos puntos de la superficie del lago. Por tal razón, se tomó la decisión de llevar a cabo dos baterías de análisis durante dos muestreos en distintas épocas del año: la de estiaje y la de lluvias.

En conjunto con personal de CIATEJ y de un estudiante de postgrado de dicha institución,[6] se acordaron los criterios para establecer los sitios de muestreo y el plan de monitoreo en el Lago de Zapotlán, considerando la toma, transportación y análisis de las muestras de agua.[7]

Normalmente, la recomendación general es que los puntos de monitoreo sean seleccionados tomando en cuenta:

- Fuentes de contaminación.
- Cambios en la topografía - batimetría del lago.
- Caudales y corrientes internas en el lago.
- Efectos de dilución.

No obstante, cuando se planearon los monitoreos de calidad del agua, los datos anteriores no se encontraron disponibles debido a la carencia de información general sobre el Lago de Zapotlán. Por tal razón, se decidió que las muestras se tomaran donde existieran condiciones turbulentas, a fin de asegurar una calidad uniforme en el punto de muestreo. Así, se optó por un monitoreo en patrón radial con respecto al centro del lago.

Para las muestras que se tomaron en los puntos de descarga (de *Ciudad Guzmán* y del municipio de *Gómez Farías*), dado que las aguas municipales fluyen en un canal abierto, fue necesario procurar que el sitio de muestreo fuese homogéneo en sus características físicas (i.e. dimensiones generales), y que la muestra fuera tomada a la mitad del área del flujo para evitar contaminación de

[6] M.C. Mario Alberto Ortiz-Jiménez, del Instituto Tecnológico de Tepic.
[7] Los análisis de las muestras de agua se llevaron a cabo en los laboratorios de CIATEJ.

la muestra misma por cercanías a las paredes de los canales (Grant, D. M., 1995).

Para las muestras que se tomaron en el interior del lago, dado que se trata de un lago somero (cuya profundidad media aproximada es de 2m y su profundidad máxima es menor a los 5m, según la Sección 2.7.8.) -por tanto se asumió que tendería a estar bien mezclado-, sólo se estimó necesario tomar las muestras apenas por debajo de la superficie cuidando que los frascos donde se colectaran las muestras fueran llenados con la boca de los mismos hacia abajo y tapándolos bajo el agua.

De acuerdo con Sawyer, C. N., McCarty, P. L. & Parkin, G. F. (2001), existen dos tipos de técnicas de preservación: la refrigeración y la adición de sustancias químicas. Para algunos parámetros de calidad del agua, deben emplearse ambas en conjunto, aunque en otras ocasiones no existe una técnica aceptable para parámetros específicos, y debe procederse al análisis inmediato (i.e. *in situ*). Así, para análisis fisicoquímicos, se consideró realizar el análisis de las muestras antes del límite de tiempo indicado en la Tabla C.1. en el Anexo C al final de esta tesis, dependiendo de las características del agua y de los parámetros a monitorear conforme a las muestras.

Debido a restricciones de tiempo y presupuesto, el primer muestreo se llevó a cabo el día 8 de mayo de 2003 (época de estiaje) en once puntos de monitoreo sobre la superficie del lago (incluyendo los dos puntos de descarga de las aguas municipales de *Zapotlán el Grande* y de *Gómez Farías*, siendo estos identificados como los puntos de monitoreo 10 y 11, respectivamente). Asimismo, el segundo monitoreo se llevó a cabo el día 19 de septiembre de 2003 en los once puntos anteriores, ubicados en sus coordenadas mediante el empleo de un dispositivo de GPS (véanse la Tabla 3.5. y la Figura 3.1.).

Los resultados de los monitoreos se incluyeron en el Anexo D de esta tesis. En algunos casos, los análisis revelaron valores de los parámetros de calidad del agua por debajo del límite de detección de la técnica y/o equipo utilizado para las condiciones particulares de cada prueba. Así, puede notarse en las Tablas D.1. a D.11. del Anexo D al final de esta tesis, que para algunos parámetros el límite de detección se modificó entre fechas de monitoreo y/o punto de muestreo; esto se debe a que para algunos parámetros tales como los microbiológicos o el oxígeno disuelto, entre otros factores, el tiempo transcurrido entre la toma de muestras y el análisis eleva el límite de detección de la prueba.

Asimismo, se consultó la *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996*, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales, a fin de comparar dichos límites con los valores correspondientes a las descargas de aguas residuales

hacia el Lago de Zapotlán de acuerdo a los resultados de los monitoreos presentados en el Apéndice D.

Tabla 3.5. Coordenadas Geográficas de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua en el Lago de Zapotlán.

Punto de Monitoreo	Latitud Norte	Longitud Oeste
1	19°45'43"	103°28'30"
2	19°45'49"	103°28'50"
3	19°45'41"	103°29'10"
4	19°45'22"	103°29'18"
5	19°45'02"	103°29'10"
6	19°44'54"	103°28'50"
7	19°45'02"	103°28'30"
8	19°45'22"	103°28'50"
9	19°45'22"	103°28'22"
10	19°44'09"	103°29'07"
11	19°46'24"	103°29'07"

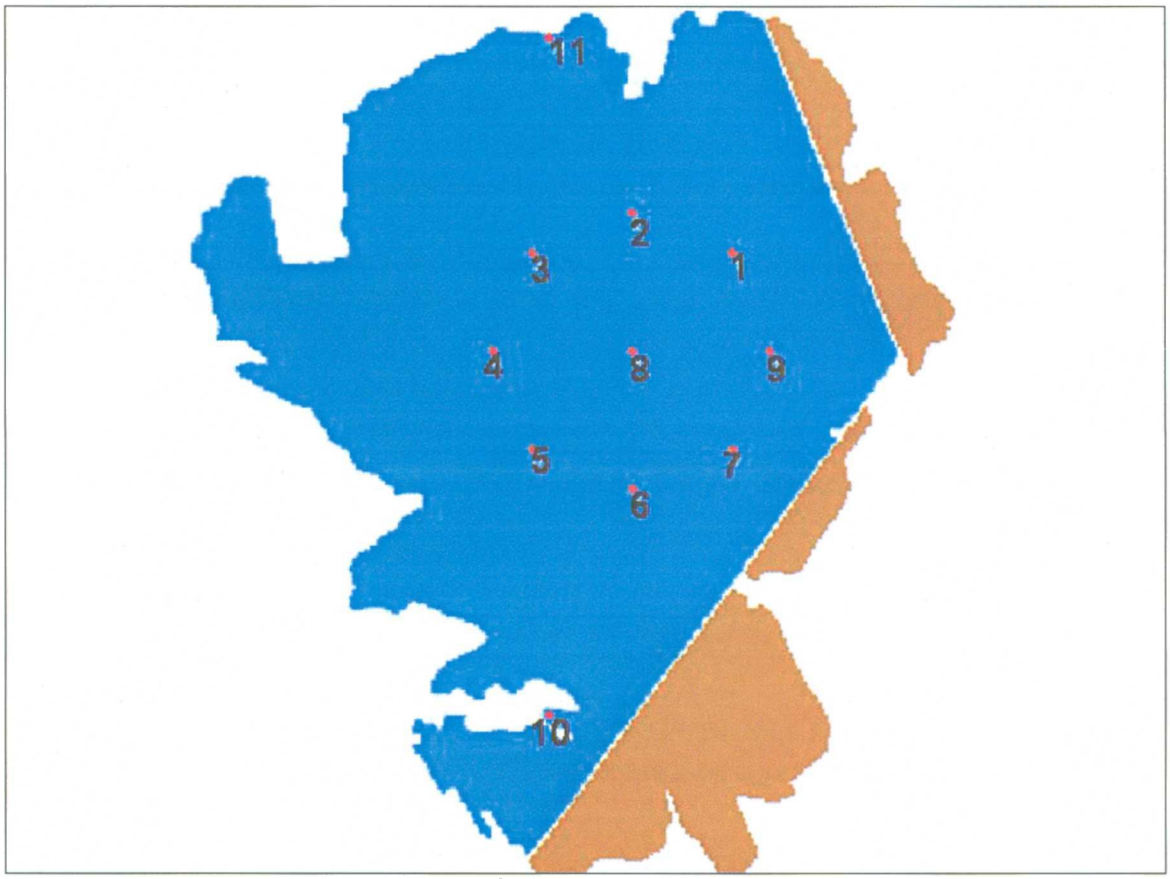

Figura 3.1. Ubicación de los Puntos de Monitoreo de Calidad del Agua en el Lago de Zapotlán.

A fin de analizar el nivel de incumplimiento de los parámetros de calidad del agua de las descargas de aguas municipales de los puntos de monitoreo 10 y 11, se definió el coeficiente de incumplimiento para cada parámetro, I_C como:

$$I_C \equiv \frac{M_V}{N_P} \tag{3.28}$$

donde M_V es el valor de calidad del agua de acuerdo al monitoreo, y N_p es el valor del parámetro de acuerdo a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

Por último, a fin de analizar valores medios únicos para todo el lago, o para los canales de descarga, se emplearon promedios geométricos, puesto que la transformada logarítmica usada para el cálculo del promedio geométrico reduce el efecto de valores extremos; por tanto su promedio geométrico es una mejor representación del valor central de la distribución de valores de un determinado parámetro para las distintas fechas del muestreo y para los diferentes puntos de monitoreo que su simple promedio aritmético (Asante-Duah, D. K., 1993). Así, el promedio geométrico se definió como:

$$\hat{x} \equiv \exp\left(\frac{\sum_{i}^{n} \ln x_i}{n}\right) \tag{3.29}$$

donde $\hat{x}$ es el promedio geométrico de los $i = 1, \ldots, n$ valores x de la muestra.

Finalmente, los diferentes valores de los parámetros de acuerdo al monitoreo se analizaron entre sí para encontrar posibles correlaciones entre ellos.

3.2.3. Construcción de un SIG para el Lago de Zapotlán

Un SIG se compone principalmente de dos tipos de referencias: mapas, y datos describiendo atributos particulares a ciertas zonas sobre el mapa. Ambos se relacionan en primera instancia a través de coordenadas espaciales, pero un SIG tiene capacidades más allá de la correspondencia espacial de los datos, pues puede hacer además análisis de las relaciones topológicas entre diferentes conjuntos de datos (Korte, G. B., 2001).

En cuanto al uso de mapas para la construcción del SIG del Lago de Zapotlán, se emplearon los mapas del *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán*

(2003) y del *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002), los cuales son mapas rectangulares correspondientes a proyecciones Universales Transversas de Mercator.[8] Estos mapas fueron importados como imágenes al programa *ArcView®*, en el cual se digitalizó el contorno del Lago de Zapotlán para crear así un *shapefile* compatible con el programa *RAISON™*.

A partir de los resultados de los datos contenidos en el Anexo D, junto con las coordenadas de los puntos de monitoreo de la Tabla 3.5., se pudo hacer la relación espacial de valores de calidad del agua para el Lago de Zapotlán, constituyendo éstos las bases de datos de información alimentados en el SIG construido en *RAISON™*. De tal forma fue posible llevar a cabo el análisis topológico de los valores de calidad del agua para el Lago de Zapotlán (consúltese la Sección 2.4. del capítulo anterior).

3.2.4. Determinación de zonas espaciales de anoxia en el Lago de Zapotlán

Para llevar a cabo la determinación de las zonas espaciales de anoxia dentro del Lago de Zapotlán, se aprovecharon las capacidades del SIG construido en *RAISON™*, de forma tal que se analizó la distribución de oxígeno disuelto en el lago.

Además, con fines de comparación, se calculó el valor máximo de referencia de oxígeno disuelto que habría en agua limpia (sin sales disueltas ni contaminación de otra especie) a una altitud de 1,500msnm y una temperatura de 20°C (en el Capítulo 2 anterior, la Sección 2.7.8. menciona que la temperatura media anual de la Cuenca del Lago de Zapotlán se encuentra entre los 18°C y los 20°C).

Para ello, se empleó la siguiente Ecuación (3.30) recomendada por la *American Public Health Association* [APHA], según Chapra, S. C. (1997):

$$o_{s,P} = o_{s,T} P \left[\frac{\left(1 - \frac{P_{vap}}{P}\right)(1 - \Theta P)}{(1 - P_{vap})(1 - \Theta)} \right] \tag{3.30}$$

[8] Las proyecciones UTM son las usadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI] en las cartas a escala 1:250,000 y 1:50,000 (véanse las secciones 2.2. y 2.7. del Capítulo 2 anterior).

donde $o_{s,P}$ es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (en *mg/L*) a la presión atmosférica dada la altitud del lago, $o_{s,T}$ es la concentración de saturación de oxígeno disuelto (en *mg/L*) a la temperatura de referencia (pero al nivel mar), P_{vap} es la presión de vapor del agua (en *atm*), Θ es un parámetro adimensional de corrección por temperatura, y P es la presión atmosférica de referencia (en *atm*).

En la Ecuación (3.30), los valores de $o_{s,T}$, P_{vap} y Θ están dados por las siguientes expresiones empíricas de la APHA según Chapra, S. C. (1997):

$$\ln o_{s,T} = -139.34411 + \frac{1.575701\times10^{5}}{T_{abs}} - \frac{6.642308\times10^{7}}{T_{abs}^{2}} + \frac{1.243800\times10^{10}}{T_{abs}^{3}} - \frac{8.621949\times10^{11}}{T_{abs}^{4}} \tag{3.31}$$

$$\ln P_{vap} = 11.8571 - \frac{3.84070\times10^{3}}{T_{abs}} - \frac{2.16961\times10^{5}}{T_{abs}^{2}} \tag{3.32}$$

$$\Theta = 9.75\times10^{-4} - 1.426\times10^{-5}T + 6.436\times10^{-8}T^{2} \tag{3.33}$$

Por otra parte, la presión atmosférica a la altitud del lago se calculó de acuerdo a la Ley de la Distribución Barométrica, según Felder, R. M. & Rousseau, R. W. (1991):

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{Mg}{RT_{abs}}h\right) \tag{3.34}$$

donde P está dada en *atm* si P_0 = *1atm* (presión atmosférica al nivel del mar), M es la masa molar del aire (*28.8kg/kgmol*), g es la constante de aceleración gravitacional (*9.81m/s*^{2}) R es la constante universal de los gases (*8,314J/[kgmol·K]*) y h es la elevación sobre el nivel del mar (*msnm*).

Asimismo, en las Ecuaciones (3.31) a (3.34) anteriores, T_{abs} es la temperatura absoluta en Kelvin, mientras que T es la temperatura de referencia en grados Celsius, es decir:

$$T_{abs}(K) = T(°C) + 273.15 \tag{3.35}$$

3.2.5. Modelación de la eutroficación en el Lago de Zapotlán

En el Capítulo 2 anterior, la Figura 2.1. indica gráficamente la interrelación entre los parámetros y factores representativos de la eutroficación de un lago. Estas interrelaciones se modelaron en términos generales de acuerdo a la solución del siguiente Sistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias simplificado y adaptado a partir del modelo propuesto por Schnoor, J. L. (1996). Este sistema de Ecuaciones (3.36) a (3.43) se basa en la simulación de un lago a manera de un reactor tanque de mezcla completa (véase la Sección 2.3. en el capítulo anterior):

$$\frac{d[P]}{dt} = -\mu B a_P + \frac{W_P(t)}{V} + k_0(\theta_0^{T-20})Df_P \tag{3.36}$$

$$\frac{d[N_1]}{dt} = -\mu B a_N\left(\frac{[N_1]}{[N_1]+[N_2]}\right) + \frac{W_{N_1}(t)}{V} + k_0(\theta_0^{T-20})Df_N - k_N[N_1]\theta_N^{T-20} \tag{3.37}$$

$$\frac{d[N_2]}{dt} = -\mu B a_N\left(\frac{[N_2]}{[N_1]+[N_2]}\right) + \frac{W_{N_2}(t)}{V} + k_N[N_1]\theta_N^{T-20} \tag{3.38}$$

$$\frac{dB}{dt} = \mu B - r_e B\theta_e^{T-20} - g_1 BZ\theta_z^{T-20} - g_2 BF_1 - v_s\frac{B}{(V/A\sup)} \tag{3.39}$$

$$\frac{dD}{dt} = -r_e B\theta_e^{T-20} - k_0\theta_0^{T-20}D - k_s D + dZ\theta_d^{T-20} \tag{3.40}$$

$$\frac{dZ}{dt} = g_1 BZ\theta_z^{T-20} - dZ\theta_z^{T-20} - g_3 ZF_1 - g_4 ZF_2 \tag{3.41}$$

$$\frac{dF_1}{dt} = g_2 BF_1 - g_3 ZF_1 - k_{d1}F_1 - g_5 F_1 F_2 \tag{3.42}$$

$$\frac{dF_2}{dt} = g_4 ZF_1 + g_5 F_1 F_2 - (k_{d2} + h)F_2 \tag{3.43}$$

En las expresiones anteriores, el significado de las variables es el que se indica a continuación:

[P]: concentración de fósforo orgánico, PO_4-P, ML^{-3}.
[N_1]: concentración de nitrógeno amoniacal NH_4-N, ML^{-3}.
[N_2]: concentración de nitrógeno de nitratos NO_3-N, ML^{-3}.
B: biomasa (base seca) de fitoplancton, ML^{-3}.
D: concentración de detritos orgánicos (base seca), ML^{-3}.
Z: biomasa (base seca) de zooplancton, ML^{-3}.

F_1: biomasa (base seca) de peces pequeños, ML^{-3}.
F_2: biomasa (base seca) de peces grandes, ML^{-3}.
t: tiempo, T.
T: temperatura, °C.
$W_P(t)$: función de carga orgánica de PO_4-P de entrada al volumen de control en función del tiempo, MT^{-1}.
$W_{N1}(t)$: función de carga orgánica de NH_4-N de entrada al volumen de control en función del tiempo, MT^{-1}.
$W_{N2}(t)$: función de carga orgánica de NO_3-N de entrada al volumen de control en función del tiempo, MT^{-1}.
a_N: razón de ($[N_1]$+ $[N_2]$):biomasa (fracción masa).
a_P: razón de [P]:biomasa (fracción masa).
V: capacidad del volumen de control, L^3.
k_0: constante cinética de hidrólisis o mineralización, T^{-1}.
θ_0: factor cinético de corrección de temperatura para la constante de mineralización.
θ_N: factor cinético de corrección de temperatura para la constante de nitrificación.
θ_e: factor cinético de corrección de temperatura para la constante de decaimiento endógeno y tasa de mortalidad de fitoplancton.
θ_d: factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de mortalidad de zooplancton.
θ_z: factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de depredación de fitoplancton por el zooplancton.
f_P: fracción masa de [P] en los detritos.
f_N: fracción masa de ($[N_1]$+ $[N_2]$) en los detritos.
k_N: constante cinética de nitrificación, T^{-1}.
r_e: constante de decaimiento endógeno y tasa de mortalidad de fitoplancton, T^{-1}.
v_s: velocidad de sedimentación del fitoplancton (en función de la viscosidad y temperatura del agua), LT^{-1}.
V/A_{sup}: profundidad media del volumen de control, L.
g_1: tasa de depredación de fitoplancton por el zooplancton, $L^3M^{-1}T^{-1}$.
g_2: tasa de depredación de fitoplancton por peces pequeños, $L^3M^{-1}T^{-1}$.
g_3: tasa de depredación de zooplancton por peces pequeños, $L^3M^{-1}T^{-1}$.
g_4: tasa de depredación de fitoplancton por peces grandes, $L^3M^{-1}T^{-1}$.
g_5: tasa de depredación de peces pequeños por peces grandes, $L^3M^{-1}T^{-1}$.
k_s: tasa aparente de sedimentación de detritos orgánicos, T^{-1}.
d: tasa de mortalidad de zooplancton, T^{-1}.
k_{d1}: tasa de mortalidad de peces pequeños, T^{-1}.
k_{d2}: tasa de mortalidad de peces grandes, T^{-1}.
h: tasa de pesca de peces grandes, T^{-1}.
μ: tasa de crecimiento de fitoplancton, T^{-1}.

Nótese que en las Ecuaciones anteriores, se encuentra implícita la corrección por temperatura de acuerdo con la Ecuación (2.14) del Capítulo anterior.

3.2.5.1. Determinación de la tasa de crecimiento de fitoplancton a partir del cálculo de la intensidad de la luz

De acuerdo con Chapra, S. C. (1997), la tasa de crecimiento de fitoplancton μ puede expresarse usando el modelo de Michaelis-Menten (cinética de Monod), indicando la dependencia con respecto a un sustrato *S*:

$$\frac{\mu}{\mu_s} = \prod_i^n \left(\frac{S}{K_s + S} \right)_i \tag{3.44}$$

donde μ_s es la tasa de crecimiento de algas con saturación de nutrientes, y K_s es la constante media de saturación de sustrato. Para el caso en que se tengan como sustratos a los nutrientes responsables de la eutroficación (fósforo -de ortofosfatos- y nitrógeno –amoniacal y de nitratos-), la expresión anterior puede escribirse como:

$$\frac{\mu}{\mu_s} = \left(\frac{[P]}{K_P + [P]} \right) \left(\frac{[N_1] + [N_2]}{K_N + [N_1] + [N_2]} \right) \tag{3.45}$$

donde K_P es la constante media de saturación de [P] , ML^{-3}, y K_N es la constante media de saturación de nitrógeno amoniacal y de nitratos, ML^{-3}.

Por otra parte, μ_s puede expresarse en términos de la función de la distribución de la intensidad de la luz *F(I)*, de acuerdo con:

$$\mu_s = \mu_{máx} F(I) \tag{3.46}$$

donde $\mu_{máx}$ es la tasa máxima de crecimiento de fitoplancton, y de acuerdo con Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987), la función *F(I)* puede escribirse usando el modelo de Steele:

$$F(I) = \frac{I}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I}{I_s} \right) \tag{3.47}$$

donde *I* es la intensidad de la luz a una determinada profundidad, e I_s es la intensidad óptima de la luz en el volumen de control para el desarrollo de fitoplancton. A fin de obtener un valor promedio de la función de distribución de la intensidad de la luz, en la expresión anterior se reemplazó *I* por la intensidad promedio de la luz en el volumen de control I_m (en función de las coordenadas del cuerpo de agua):

$$F(I_m) = \frac{I_m}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I_m}{I_s} \right) \tag{3.48}$$

Asimismo, de acuerdo con Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987), la tasa máxima de crecimiento de fitoplancton $\mu_{máx}$ varía en función de la temperatura según la siguiente expresión:

$$\mu_{máx} = \mu_{máx,20}\theta_b^{T-20} \tag{3.49}$$

donde $\mu_{máx,20}$ es el valor de la tasa máxima de crecimiento de fitoplancton a 20°C, θ_b es el factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de crecimiento de fitoplancton, y T es la temperatura del agua en grados Celsius.

Sustituyendo hacia atrás las seis expresiones anteriores, se llegó a la siguiente Ecuación (3.50), confirmada por Schnoor, J. L. (1996):

$$\mu = \mu_{\max}\left(\frac{[P]}{K_P+[P]}\right)\left(\frac{[N_1]+[N_2]}{K_N+[N_1]+[N_2]}\right)\left[\frac{I_m}{I_s}\exp\left(1-\frac{I_m}{I_s}\right)\right]\theta_b^{T-20} \tag{3.50}$$

Así, según la Ecuación (3.50), la tasa de crecimiento de fitoplancton se expresa en función de las concentraciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo), la tasa máxima de crecimiento de fitoplancton, un factor cinético de corrección por temperatura para el crecimiento del fitoplancton, la intensidad de la luz a la profundidad media del lago y la intensidad de la luz óptima para el desarrollo de fitoplancton -la cual varía dependiendo de las especies de algas presentes en el plancton, siendo las más comunes clorofitas, diatomeas y flageladas, de acuerdo con Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987)-.

Las concentraciones de los nutrientes son particulares a cada cuerpo lacustre. En cuanto a los demás factores de los cuales depende la tasa de crecimiento de fitoplancton, con excepción de la temperatura y la intensidad promedio de la luz, todos son constantes, cuyos valores son recomendados por Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987): $\mu_{máx}$ = 1.8d^{-1} a 20°C, θ_b = 1.066 (factor adimensional) y I_s = 300*ly/d* (el valor de 300 langleys por día se recomienda para poblaciones mixtas de fitoplancton o poblaciones de fitoplancton en las cuales no se ha caracterizado el tipo de especie predominante).

De esta forma, sólo resta contar con una forma para determinar la intensidad promedio de la luz dada la profundidad del lago. Para ello, Chapra, S. C. (1997) recomienda el uso de la siguiente expresión:

$$I_m = \frac{I_0}{k_e H}\left(1-e^{-k_e H}\right) \tag{3.51}$$

donde I_0 es la intensidad de la luz en la superficie del lago (*ly/d*), y k_e es el coeficiente de extinción (m^{-1}) del lago. El coeficiente de extinción depende de las

concentraciones en el agua de sólidos inorgánicos, partículas de detritos y niveles de fitoplancton.

El cálculo del coeficiente de extinción se llevó a cabo a partir de la Ley de Beer-Lambert, a continuación:

$$\frac{I_H}{I_0} = e^{-k_e H} \tag{3.52}$$

donde I_H es la intensidad de la luz a la profundidad H del lago. Para encontrar el coeficiente de extinción, fue necesario estimar la profundidad del disco Secchi *SD.*[9] De acuerdo con Chapra, S.C. (1997), la profundidad del disco Secchi es la profundidad (en metros) a la cual ya no es visible dicho disco desde la superficie del agua, estimándose que a dicha profundidad se ha extinguido el 85% de la intensidad de la luz recibida en la superficie del lago -es decir, restando sólo el 15% de la intensidad I_0-. Así, según la propia Ley de Beer-Lambert:

$$k_e = -\frac{\ln(0.15)}{SD} \tag{3.53}$$

Para el Lago de Zapotlán, no se contó en particular con una medición experimental de la profundidad del disco Secchi. En tal caso, Chapra, S. C. (1997) recomienda el uso de la correlación de Rast y Lee a partir de la concentración de clorofila *a [Chla]* en $\mu g/L$:

$$\log(SD) = -0.473\log([Chla]) + 0.803 \tag{3.54}$$

Una vez determinado el coeficiente de extinción de acuerdo a las expresiones anteriores, para calcular el valor de I_m según la Ecuación (3.51), antes fue necesario estimar la intensidad de la luz solar I_0 recibida diariamente sobre la superficie del lago. Este valor es particular para cada día n del año, y es función de la latitud geográfica ϕ en la que se encuentra el lago, y del fotoperíodo diario[10].

Una expresión que combina los factores anteriores es propuesta por Hermosillo, J. J., Gudiño, D. y Mendoza, M. (1995), la cual se incluye a continuación:

---

[9] El disco Secchi es una herramienta para medir la transparencia del agua. Consiste en un disco circular dividido en sectores entre los cuales la coloración resalta el contraste entre un sector y el siguiente (usualmente, se alterna el blanco y el negro en los sectores). El disco en forma paralela a la superficie del agua, y se registra la profundidad a la cual ya no es visible dentro del líquido.

[10] Para cada día del año, el tiempo entre el amanecer y el ocaso es llamado técnicamente el fotoperíodo diario.

$$I_0 = G_{SC}\frac{86{,}400}{\pi}\left[1+0.033\cos\left(\frac{360°}{365}n\right)\right]\left(\cos\phi\cos\delta sen\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360°}sen\phi sen\delta\right) \quad (3.55)$$

En la Ecuación (3.55), δ es el ángulo de declinación del sol con respecto al ecuador terrestre para el día n del año, ω_s es el ángulo horario a la salida y puesta del Sol con respecto a la vertical, y G_{SC} es la constante solar,[11] cuyo valor es de 1,367W/m^2, según es recomendado por Twidell, J. & Weir, T. (1986).

Por último, para el cálculo de los ángulos δ y ω_s, Hermosillo, J. J., Gudiño, D. y Mendoza, M. (1995) proponen las siguientes expresiones, respectivamente:

$$\delta = 23.45° sen\left(360°\frac{284+n}{365}\right) \quad (3.56)$$

$$\omega_s = ArcCos(-\tan\phi\tan\delta) \quad (3.57)$$

Por otra parte, dado que en la Ecuación (3.55) el valor de la constante solar se encuentra en W/m^2, la intensidad I_0 estará dada en J/m^2 por día. Dado que este valor eventualmente se usó para calcular I_m, y éste fue comparado en la Ecuación (3.50) contra la intensidad óptima de 300*ly* por día, su valor fue transformado a *langleys* por día.[12]

Asimismo, cabe señalar que para la solución del sistema descrito por las Ecuaciones (3.36) a (3.57), las variables geométricas del Lago de Zapotlán (volumen, área superficial, profundidad y profundidad media) se calcularon a partir de los valores promedio mensuales de altitud de la superficie del lago durante el período 1982-2002 (véase la Tabla 3.1), empleando las Ecuaciones (3.4) a (3.7) descritas al inicio de la Sección 3.2.1.

3.2.5.2. Descripción del Método del Punto Medio para resolver sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias

De acuerdo con la Sección 3.2.4, el sistema fue descrito de acuerdo a las Ecuaciones (3.36) a (3.57). El subconjunto de las Ecuaciones (3.36) a (3.43) forma un Subsistema de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (llamado *SEDO* de aquí en adelante), el cual fue resuelto numéricamente utilizando el Método del Punto Medio, empleando un único volumen de control para incluir a todo el Lago

[11] La constante solar es el valor del flujo razonablemente uniforme de energía proveniente del Sol a la distancia promedio entre dicho astro y la Tierra a lo largo del año.
[12] 1J/m^2= 2.3901x10^{-5} cal/cm^2, 1*ly* = 1cal/cm^2.

de Zapotlán a manera de aproximación. Para el resto de las expresiones, aún cuando éstas no formaban parte del SEDO propiamente, fue necesario sin embargo, repetir su cálculo en cada iteración empleada para la solución numérica del SEDO, pues sus valores variaban en función del tiempo afectando directamente la solución del sistema. De estas expresiones, sólo las Ecuaciones (3.53) y (3.54) pudieron considerarse invariantes con respecto al tiempo *para efectos de cálculo*, y fueron por tanto, las únicas expresiones evaluadas una sola vez a lo largo de la solución del problema.

A continuación, a fin de explicar el proceso de solución del sistema, se describe el *Método del Punto Medio*, y después se hace un recuento de los datos y parámetros empleados para alimentar un algoritmo programado en *MS Excel®* empleado para su solución.

De acuerdo con Burden, R.L & Faires, J.D. (1998), el *Método del Punto Medio* para aproximar la solución de un Sistema de *m* Ecuaciones Diferenciales Ordinarias, entre los límites α y β con N iteraciones, puede expresarse como:

$$w_{i+1,j} = w_{i,j} + hf_j\left(t_i + \frac{1}{2}h, w_{i,j} + \frac{1}{2}hf_j(t_i, w_{i,j})\right), \text{ para } i = 0, 1, \ldots, N-1. \tag{3.58}$$

donde en este caso el subíndice *j* denota la *j*-ésima ecuación del SEDO, y, las condiciones iniciales α_i se emplean en la forma:

$$w_{0,j} = \alpha_i, \text{ para } i = 1, 2, \ldots, m: \tag{3.59}$$

Finalmente, la variable *h* se denomina *tamaño de paso*, y se define como:

$$h \equiv \frac{t_f - t_0}{N} \tag{3.60}$$

donde $t_f = \beta$ y $t_0 = \alpha$ son los límites superior e inferior de la variable independiente (usualmente el tiempo) entre los cuales se resuelve el SEDO.

El método del punto medio para resolver un SEDO se prefirió sobre otros métodos, tales como los de Runge-Kutta, para evitar problemas en la solución relacionados con la *rigidez* de las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias.

La rigidez es un fenómeno que se da en la solución *numérica* de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias cuando su solución *analítica* implica funciones exponenciales (tales como las ecuaciones que describen reacciones químicas o dinámicas poblacionales de diversas especies, como los modelos cazador-presa de Lotka-Volterra).

El efecto de la rigidez de una Ecuación Diferencial es que puede distorsionarse la solución numérica (incrementándose el error en forma exponencial entre cada iteración de acuerdo al tamaño de paso)[13] si ésta se obtiene mediante métodos como los de Runge-Kutta.

Aunque el Método del Punto Medio se considera *inferior* en su exactitud con respecto a otros métodos de solución de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (como por ejemplo, los Métodos de Runge-Kutta, en particular el de Cuarto Orden), éste se eligió no sólo por su facilidad de cálculo y programación, sino porque el método es inmune a la rigidez de las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (Burden, R.L & Faires, J.D., 1998).

[13] Cuando una Ecuación Diferencial Ordinaria es rígida, el error en su solución numérica según métodos como los de Runge-Kutta sólo disminuirá empleando tamaños de paso infinitesimalmente pequeños, aumentándose considerablemente la necesidad de iteraciones.

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en la investigación de acuerdo con la metodología explicada en el Capítulo 3 anterior. Los resultados se han clasificado en tres grandes rubros: la descripción del modelo hidrológico del Lago de Zapotlán en base a la obtención del balance volumétrico del lago a partir de su modelo morfométrico, el análisis de la calidad del agua del Lago de Zapotlán a partir de los monitoreos efectuados, y la eutroficación del vaso lacustre de acuerdo al procesamiento de la información disponible y solución del modelo matemático propuesto en la Sección 3.2.4. del capítulo anterior.

4.1. Modelo hidrológico del Lago de Zapotlán

El modelo hidrológico del Lago de Zapotlán propuesto consiste en la conjunción de su geometría con el funcionamiento del vaso lacustre a lo largo del año. La primera de esas consideraciones corresponde al ajuste de las dimensiones del lago a un modelo morfométrico; y la segunda, a la aproximación de la dinámica de los flujos relacionados con dicho cuerpo de agua para caracterizar el balance volumétrico del mismo, por una parte, y por otra, la descripción de sus tiempos de retención hidráulica. Todas las partes del modelo hidrológico son descritas a continuación en función de los resultados obtenidos.

4.1.1. Modelo morfométrico del Lago de Zapotlán

Como se recordará, en el Capítulo 3 se propuso un modelo morfométrico linealizado en la Ecuación (3.5), de forma tal que de ajustarse los datos del levantamiento topobatimétrico del Lago de Zapotlán, la gráfica del logaritmo natural de la profundidad máxima en el lago $ln(H)$ contra el logaritmo natural de su relación de volumen a área superficial $ln(V/A_{sup})$ -relación también denominada como *profundidad media*-, correspondería a una línea recta con pendiente n y ordenada al origen equivalente al logaritmo natural de una constante de proporcionalidad $ln(k)$.

A continuación, la Tabla 4.1. contiene las transformaciones logarítmicas naturales de la profundidad máxima y la profundidad media a partir de los datos batimétricos del Lago de Zapotlán según el levantamiento de 2003 (véase la Tabla 2.5.). Nótese que en la Tabla 4.1. se han omitido los valores correspondientes a las dos cotas más inferiores para evitar perturbaciones en el modelo por la proximidad al fondo del lago (de Anda, J., 1998).

Tabla 4.1. Logaritmos Naturales de las Variables Geométricas del Lago de Zapotlán.

Altitud	H	A_{sup}	V	V/A_{sup}	ln(H)	$\ln(V/A_{sup})$
(msnm)	*(m)*	*(m^2)*	*(m^3)*	*(m)*		
1493.75	0.50	494,244.61	84,157.68	0.1703	-0.6931	-1.7703
1494.00	0.75	952,328.85	243,280.76	0.2555	-0.2877	-1.3647
1494.25	1.00	1,485,116.20	547,961.39	0.3690	0.0000	-0.9970
1494.50	1.25	2,233,211.48	1,012,752.35	0.4535	0.2231	-0.7908
1494.75	1.50	2,981,062.42	1,664,536.59	0.5584	0.4055	-0.5827
1495.00	1.75	3,405,737.26	2,462,886.55	0.7232	0.5596	-0.3241
1495.25	2.00	3,887,444.83	3,374,534.31	0.8681	0.6931	-0.1415
1495.50	2.25	4,284,448.43	4,396,020.97	1.0260	0.8109	0.0257
1495.75	2.50	4,653,043.31	5,513,207.44	1.1849	0.9163	0.1696
1496.00	2.75	5,869,456.47	6,828,519.91	1.1634	1.0116	0.1513
1496.25	3.00	7,003,253.45	8,437,608.65	1.2048	1.0986	0.1863
1496.50	3.25	7,781,480.52	10,285,700.39	1.3218	1.1787	0.2790
1496.75	3.50	9,056,831.63	12,390,489.41	1.3681	1.2528	0.3134
1497.00	3.75	10,387,126.07	14,820,984.12	1.4269	1.3218	0.3555
1497.25	4.00	11,386,615.45	17,542,701.81	1.5406	1.3863	0.4322
1497.50	4.25	12,104,694.73	20,479,115.59	1.6918	1.4469	0.5258
1497.75	4.50	12,855,844.90	23,599,183.04	1.8357	1.5041	0.6074
1498.00	4.75	13,409,042.68	26,882,293.99	2.0048	1.5581	0.6955

En la página siguiente, la Figura 4.1. presenta la gráfica correspondiente a los logaritmos naturales de las variables geométricas del Lago de Zapotlán. Asimismo, la Tabla 4.2. a continuación contiene los parámetros determinados a partir de la linealización del modelo morfométrico para el lago de Zapotlán.

Tabla 4.2. Parámetros de la Linealización del Modelo Morfométrico del Lago de Zapotlán.

n	ln k	k
1.08060	-0.98749	0.37251
r^2	r	SQR
0.98940	0.99469	0.00501

De tal forma, la linealización del modelo morfométrico es de la forma:

$$\ln\left(\frac{V}{A_{sup}}\right) = -0.98749 + 1.08060 \ln H \tag{4.1}$$

Así, la linealización del modelo propuesta según la Ecuación (4.1) se consideró adecuada, debido al elevado valor del correspondiente coeficiente de determinación $r^2 = 0.98940$ y a la forma de su grafica asemejando, en efecto, a una línea recta.

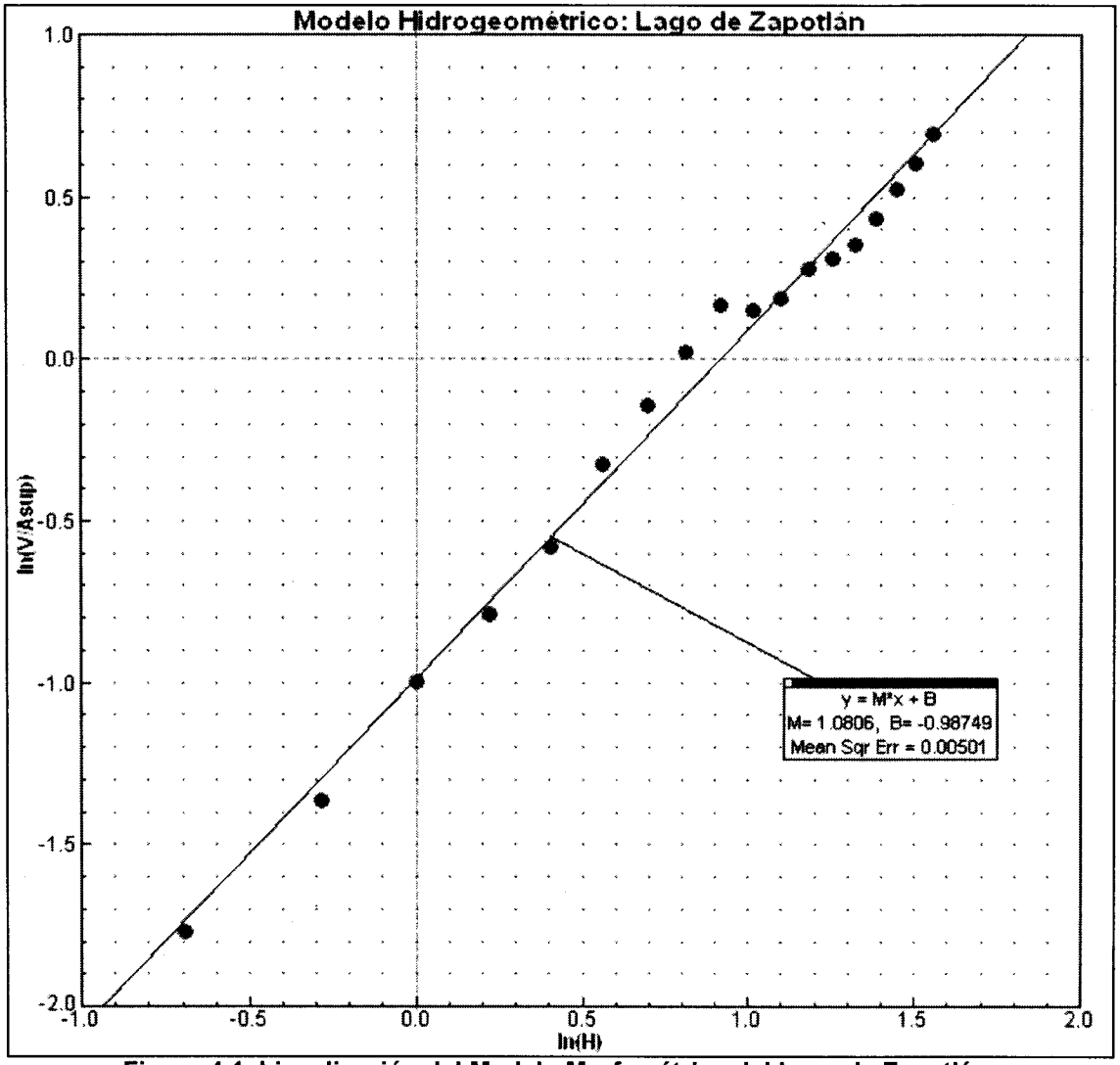

Figura 4.1. Linealización del Modelo Morfométrico del Lago de Zapotlán.

Por lo tanto, el Modelo Morfométrico propuesto para el Lago de Zapotlán fue:

$$\frac{V}{A_{\sup}} = 0.37251H^{1.08060} \tag{4.2}$$

donde H está en m, V en m^3, y A_{sup} en m^2.

Por otra parte, se recuerda que la profundidad máxima *H* está dada en función de la cota superficial del Lago de Zapotlán h_s:

$$H = h_s - 1{,}493.25 \tag{4.3}$$

donde *H* está en *m* y h_s en *msnm*.

Por otra parte, en cuanto a las regresiones polinomiales para expresar tanto al volumen como al área superficial en función de la profundidad máxima del lago, así como al volumen en función del área superficial y viceversa, en la Tabla 4.3. se presentan en seguida los coeficientes constantes A, B, C y *D* de las regresiones polinomiales de la forma:

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 \tag{4.4}$$

donde *y* es la variable dependiente, y *x* es la variable independiente en la regresión polinomial de grado tres. Asimismo, en la Tabla 4.3. se indican los valores del coeficiente de determinación, junto con el valor absoluto del coeficiente de correlación. Las curvas correspondientes se muestran en el Anexo F al final de esta tesis.

Tabla 4.3. Coeficientes Constantes de las Regresiones Polinomiales de las Variables Geométricas del Lago de Zapotlán.

Ecuación	y		x		A	B	C	D	r^2	|r|
(3.7)	*V*	*(m³)*	*H*	*(m)*	-1.29160E+05	1.53190E+05	4.69120E+05	1.47730E+05	0.9999	0.9999
(3.8)	A_{sup}	*(m²)*	*H*	*(m)*	2.46790E+04	7.47300E+05	6.74600E+05	-4.58140E+04	0.9946	0.9973
(3.9)	V	*(m³)*	A_{sup}	*(m²)*	-7.50190E+05	1.15000E+00	-3.49200E-08	7.72541E-15	0.9946	0.9973
(3.10)	A_{sup}	*(m²)*	V	*(m³)*	8.40880E+05	8.87020E-01	-1.93950E-08	1.43540E-16	0.9932	0.9966

Tras apreciar en el Apéndice F las curvas correspondientes a las regresiones polinomiales de la Tabla 4.3., se consideró que junto con la Ecuación (4.3) y con el modelo morfométrico de la Ecuación (4.2), el Lago de Zapotlán conviene ser descrito únicamente además por la regresión de la Ecuación (3.7), es decir:

$$V = -1.29160x10^5 + 1.53190x10^5 H + 4.69120x10^5 H^2 + 1.47730x10^5 H^3 \tag{4.5}$$

donde *H* está en m, y *V* en m^3.

Nótese que con tan sólo conocer la cota superficial h_s, las Ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.5) permiten a su vez calcular la profundidad máxima del lago *H*, el volumen almacenado en el lago *V*, la profundidad media del lago V/A_{sup} y el área del espejo de agua de la superficie del lago A_{sup}, es decir, todas la variables geométricas del Lago de Zapotlán. A continuación, se muestran los valores de las variables geométricas del Lago de Zapotlán calculados con ayuda de las Ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.5). La Tabla 4.4. fue calculada a partir de las

altitudes de las cotas superficiales determinadas por el levantamiento batimétrico del Lago de Zapotlán, mientras que la Tabla 4.5. fue calculada a partir de las altitudes mensuales promedio de las cotas superficiales durante el periodo 1982-2002, de acuerdo con la Tabla 3.1 en el capítulo anterior.

Tabla 4.4. Descripción Geométrica del Lago de Zapotlán en Función de las Cotas Superficiales de Acuerdo con el Levantamiento Batimétrico de 2003.

Altitud h_s (msnm)	Profundidad Máxima H (m)	Volumen almacenado V (m^3)	Profundidad Media V/A_{sup} (m)	Área Superficial A_{sup} (m^2)
1493.75	0.50	83,181	0.18	472,263
1494.00	0.75	311,936	0.27	1,142,721
1494.25	1.00	640,880	0.37	1,720,452
1494.50	1.25	1,083,863	0.47	2,286,226
1494.75	1.50	1,654,734	0.58	2,866,221
1495.00	1.75	2,367,343	0.68	3,471,363
1495.25	2.00	3,235,540	0.79	4,106,951
1495.50	2.25	4,273,175	0.89	4,775,821
1495.75	2.50	5,494,096	1.00	5,479,590
1496.00	2.75	6,912,155	1.11	6,219,226
1496.25	3.00	8,541,200	1.22	6,995,318
1496.50	3.25	10,395,081	1.33	7,808,229
1496.75	3.50	12,487,649	1.44	8,658,179
1497.00	3.75	14,832,752	1.55	9,545,295
1497.25	4.00	17,444,240	1.67	10,469,642
1497.50	4.25	20,335,963	1.78	11,431,243
1497.75	4.50	23,521,771	1.89	12,430,093
1498.00	4.75	27,015,514	2.01	13,466,164

Tabla 4.5. Descripción Geométrica del Lago de Zapotlán en Función de las Cotas Mensuales Promedio para el Período 1982-2002.

Mes del año	Altitud h_s (msnm)	Profundidad Máxima H (m)	Volumen almacenado V (m^3)	Profundidad Media V/A_{sup} (m)	Área Superficial A_{sup} (m^2)
Enero	1,498.07	4.82	28,050,830	2.04	13,762,929
Febrero	1,497.93	4.68	26,005,426	1.97	13,172,315
Marzo	1,497.73	4.48	23,255,758	1.88	12,348,815
Abril	1,497.43	4.18	19,497,233	1.75	11,158,240
Mayo	1,497.05	3.80	15,333,295	1.58	9,727,184
Junio	1,496.77	3.52	12,665,780	1.45	8,727,779
Julio	1,497.14	3.89	16,261,479	1.62	10,058,340
Agosto	1,497.55	4.30	20,949,155	1.80	11,628,034
Septiembre	1,497.92	4.67	25,863,169	1.97	13,130,574
Octubre	1,498.21	4.96	30,198,361	2.10	14,365,200
Noviembre	1,498.28	5.03	31,311,185	2.13	14,670,703
Diciembre	1,498.22	4.97	30,355,728	2.11	14,408,665
Promedio anual	1,497.69	4.44	23,312,283	1.87	12,263,232

Del análisis de las Tablas 4.4. y 4.5., resulta interesante considerar que ninguna de ellas sugiere un incremento en el nivel del agua tal que se rebase la altitud de la carretera libre Guadalajara-Ciudad Guzmán (1,500msnm). No obstante, tal suceso ocurrió en el mes de noviembre de 2003 (un año atípico debido a la abundancia de agua pluvial fuera de temporal durante la segunda mitad del año).

En caso de que las Ecuaciones (4.2) y (4.5) admitan extrapolaciones de tal magnitud, los cálculos indican que si la superficie del lago alcanzó los 1,5000msnm, entonces el volumen contenido en el lago era superiror a los 67.7Mm^3, es decir, unas 2.51 veces el volumen máximo del lago al momento del levantamiento batimétrico realizado por CEAS en abril del mismo año, de acuerdo con la Tabla 4.4. Asimismo, este volumen es unas 2.16 veces el volumen promedio máximo de la Tabla 4.5. (correspondiente también para el mes de noviembre). Asimismo, el área superficial estimada fue de 23.1Mm^2 (2,310ha) es decir, 1.71 veces el área promedio máxima del lago considerado en la Tabla 4.4., y aproximadamente 1.57 veces el área superficial promedio máxima de la Tabla 4.5. (desde luego, también para el mes de noviembre).

Por otra parte, el análisis de los datos puntuales de la Tabla B.1. del Anexo B revela que el nivel máximo registrado en el Lago de Zapotlán durante el período 1982-2002 se registró en noviembre de 2003, con 1499.25msnm (75cm por debajo del nivel de la carretera). Asimismo, el nivel mínimo durante ese período correspondió a junio de 1991, con 1495.18msnm, correspondiendo a esta altitud un volumen aproximado de 3.0Mm^3, y un área superficial de tan sólo 3.9Mm^2 (390ha).

Finalmente, parece poco probable que una avenida de temporal llegue a elevar el nivel del lago en forma tal que se inunde Ciudad Guzmán, pues la altitud media de esta se encuentra a 1,520msnm, de acuerdo con la Tabla 2.7. (o en tal caso, San Sebastián del Sur, a 1,510msnm –véase la Tabla 2.6) en el Capítulo 2.

4.1.2. Balance volumétrico del Lago de Zapotlán

Una vez que se hubo descrito la geometría del Lago de Zapotlán a partir de las Ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.5) presentadas en la sección anterior, para completar el modelo hidrológico del lago fue necesario explicar el funcionamiento del vaso lacustre de acuerdo al balance volumétrico propuesto en la Ecuación

$$\Delta V = V_d + V_p + V_{esc} - V_{ext} - V_{evap} \tag{4.6}$$

Sin embargo, antes de presentar los resultados del balance según la Ecuación (4.6), fue necesario presentar las memorias de cálculos de los diversos volúmenes considerados en el miembro derecho de tal expresión. Las excepciones claras son los volúmenes mensuales de descargas de aguas residuales V_d, y los volúmenes mensuales de extracción V_{ext}, pues éstos se tomaron de acuerdo a los datos proporcionados por CEAS en el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) -consúltese la Sección 3.2.1. de esta tesis-. Tales volúmenes se indican a continuación en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Volúmenes Mensuales de Descargas y Extracciones para el Lago de Zapotlán, según CEAS.

Mes del año	Descargas V_d (m^3)	Extracciones V_{ext} (m^3)
Enero	332,245	1,427,000
Febrero	332,245	1,342,000
Marzo	379,708	1,813,000
Abril	427,172	2,029,000
Mayo	474,635	1,820,000
Junio	879,307	800,000
Julio	703,446	368,000
Agosto	791,377	499,000
Septiembre	791,377	499,000
Octubre	703,446	623,000
Noviembre	703,446	878,000
Diciembre	329,879	1,002,000
Total Anual	*6,848,282*	*13,100,000*

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003).

Por otra parte, en cuanto a los otros volúmenes mensuales considerados en la Ecuación (4.6), a continuación se presentan las memorias de cálculo para:

a) El volumen mensual entrante por precipitación al Lago de Zapotlán V_p, según la Ecuación (3.18) –véase la Tabla 4.7.-.

b) El volumen mensual de entrada al Lago de Zapotlán por escorrentías superficiales –arroyos- V_{esc}, de acuerdo con la Ecuación (3.19) –consúltese la Tabla 4.8.-.

c) El volumen mensual de pérdidas por evaporación a través de la superficie del Lago de Zapotlán V_{evap}, acorde con la Ecuación (3.23) –véase la Tabla 4.9.-.

En la Tabla 4.7., puede apreciarse que la precipitación sobre la Cuenca de Zapotlán es perceptiblemente superior durante los meses de junio hasta octubre, inclusive. Esta temporada se reconoció como la temporada de lluvias, mientras que la temporada desde noviembre hasta mayo se le llamó la temporada de estiaje. El comportamiento inverso se observa en las extracciones de líquido según la Tabla 4.6., lo cual es congruente si se considera que el 65% del agua

extraída del lago tiene uso agrícola (consúltese la Tabla 1.1. en el Capítulo 1 de esta tesis), por lo que disminuye la demanda de agua del lago durante la temporada de lluvias.

Tabla 4.7. Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Entrada al Lago de Zapotlán por Precipitación.

Mes del año	Precipitación sobre la cuenca *(mm)*	Área Superficial del lago *(m^2)*	Volumen de precipitación sobre el lago *(m^3)*
Enero	27.6	13,762,929	379,972
Febrero	5.1	13,172,315	67,678
Marzo	4.1	12,348,815	51,057
Abril	2.0	11,158,240	22,428
Mayo	28.9	9,727,184	280,931
Junio	141.9	8,727,779	1,238,149
Julio	175.0	10,058,340	1,759,913
Agosto	175.6	11,628,034	2,042,261
Septiembre	151.0	13,130,574	1,982,113
Octubre	75.2	14,365,200	1,080,258
Noviembre	19.6	14,670,703	287,985
Diciembre	6.7	14,408,665	96,465
Total anual	*812.7*	---	*9,289,209*

Tabla 4.8. Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Entrada al Lago de Zapotlán por Escorrentías Superficiales.

Área de impacto *(m^2)*	Parámetro de permeabilidad *K*	Coeficiente de escurrimiento C_e
425,000,000	0.1580	0.0498
Mes del año	**Precipitación sobre la cuenca *(mm)***	**Volumen de escorrrentía hacia el lago *(m^3)***
Enero	27.6	584,189
Febrero	5.1	108,717
Marzo	4.1	87,487
Abril	2.0	42,531
Mayo	28.9	611,119
Junio	141.9	3,001,803
Julio	175.0	3,702,353
Agosto	175.6	3,716,361
Septiembre	151.0	3,194,168
Octubre	75.2	1,591,214
Noviembre	19.6	415,366
Diciembre	6.7	141,663
Total anual	*812.7*	*17,196,974*

Tabla 4.9. Memoria de Cálculo de los Volúmenes Mensuales Promedio de Salida del Lago de Zapotlán por Evaporación.

		Factor de eficiencia η	0.92
Mes del año	**Evaporación superficial *(mm)***	**Área Superficial del lago *(m^2)***	**Volumen de evaporación desde el lago *(m^3)***
Enero	109.8	13,762,929	1,390,396
Febrero	136.8	13,172,315	1,658,253
Marzo	194.3	12,348,815	2,207,910
Abril	210.6	11,158,240	2,161,839
Mayo	198.8	9,727,184	1,779,027
Junio	140.3	8,727,779	1,126,627
Julio	113.6	10,058,340	1,051,275
Agosto	113.3	11,628,034	1,211,590
Septiembre	103.5	13,130,574	1,250,529
Octubre	113.8	14,365,200	1,504,501
Noviembre	104.5	14,670,703	1,410,004
Diciembre	97.7	14,408,665	1,294,629
Total anual	*1,637.0*	---	*18,046,580*

Dado que ya se han presentado todos los volúmenes mensuales considerados en el miembro derecho de la Ecuación (4.6), sólo resta combinarlos para completar el balance volumétrico del Lago de Zapotlán, el cual puede visualizarse en la Tabla 4.10. (nótese que se ha hecho la distinción entre la temporada de lluvias y la de estiaje).

Tabla 4.10. Balance Volumétrico del Lago de Zapotlán.

Temporada	Mes del año	Entradas			Salidas		Lago
		Descargas V_d *(m^3)*	Precipitación V_p *(m^3)*	Escorrentías V_{esc} *(m^3)*	Extracciones V_{ext} *(m^3)*	Evaporación V_{evap} *(m^3)*	Incremento ΔV *(m^3)*
Lluvias	Junio	879,307	1,238,149	3,001,803	800,000	1,126,627	3,192,633
	Julio	703,446	1,759,913	3,702,353	368,000	1,051,275	4,746,438
	Agosto	791,377	2,042,261	3,716,361	499,000	1,211,590	4,839,410
	Septiembre	791,377	1,982,113	3,194,168	499,000	1,250,529	4,218,129
	Octubre	703,446	1,080,258	1,591,214	623,000	1,504,501	1,247,416
Estiaje	Noviembre	703,446	287,985	415,366	878,000	1,410,004	-881,208
	Diciembre	329,879	96,465	141,663	1,002,000	1,294,629	-1,728,622
	Enero	332,245	379,972	584,189	1,427,000	1,390,396	-1,520,991
	Febrero	332,245	67,678	108,717	1,342,000	1,658,253	-2,491,613
	Marzo	379,708	51,057	87,487	1,813,000	2,207,910	-3,502,658
	Abril	427,172	22,428	42,531	2,029,000	2,161,839	-3,698,708
	Mayo	474,635	280,931	611,119	1,820,000	1,779,027	-2,232,341
Año	*Total Anual*	*6,848,282*	*9,289,209*	*17,196,974*	*13,100,000*	*18,046,580*	*2,187,885*

En la Tabla 4.10., fue posible observar que el incremento mensual de volumen ΔV sólo es positivo durante la temporada de lluvias, mientras que durante la temporada de estiaje hay un decremento en el nivel de agua.

No obstante, el balance anual es positivo, por lo que se espera que el nivel del lago se recupere en cada ciclo anual, aunque el superávit de agua es pequeño con respecto al total de entradas y salidas (tan sólo alrededor del 7% en cada caso sobre una base anual), como puede verse en la Tabla 4.11. Finalmente, se presentan a continuación las Figuras 4.2., 4.3. y 4.4., las cuales representan gráficamente los volúmenes mensuales contenidos en las Tablas 4.10. y 4.11.

Tabla 4.11. Entradas y Salidas Totales de Agua para el Lago de Zapotlán.

Temporada	Mes del año	Entradas (m^3)	Salidas (m^3)	Incremento (m^3)
Lluvias	Junio	5,119,260	1,926,627	3,192,633
	Julio	6,165,712	1,419,275	4,746,438
	Agosto	6,549,999	1,710,590	4,839,410
	Septiembre	5,967,658	1,749,529	4,218,129
	Octubre	3,374,918	2,127,501	1,247,416
Estiaje	Noviembre	1,406,797	2,288,004	-881,208
	Diciembre	568,007	2,296,629	-1,728,622
	Enero	1,296,405	2,817,396	-1,520,991
	Febrero	508,640	3,000,253	-2,491,613
	Marzo	518,252	4,020,910	-3,502,658
	Abril	492,131	4,190,839	-3,698,708
	Mayo	1,366,686	3,599,027	-2,232,341
Año	*Total Anual*	*33,334,465*	*31,146,580*	*2,187,885*

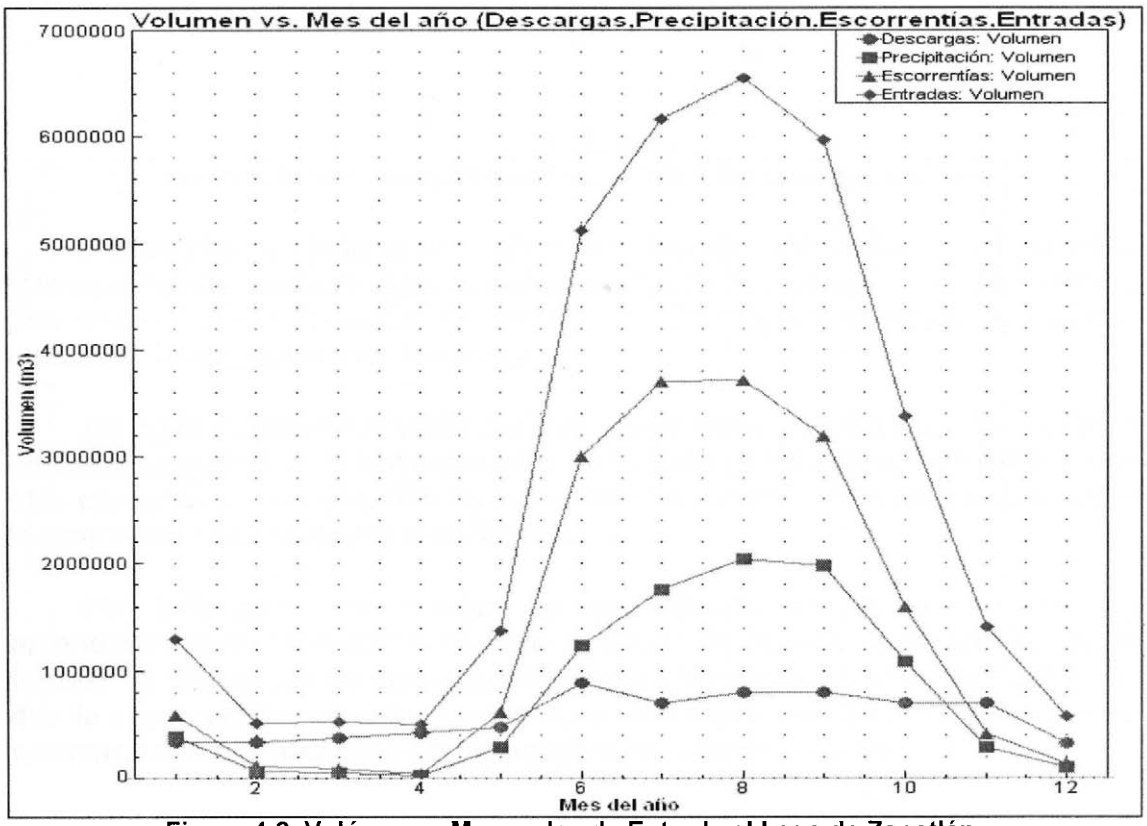

Figura 4.2. Volúmenes Mensuales de Entrada al Lago de Zapotlán.

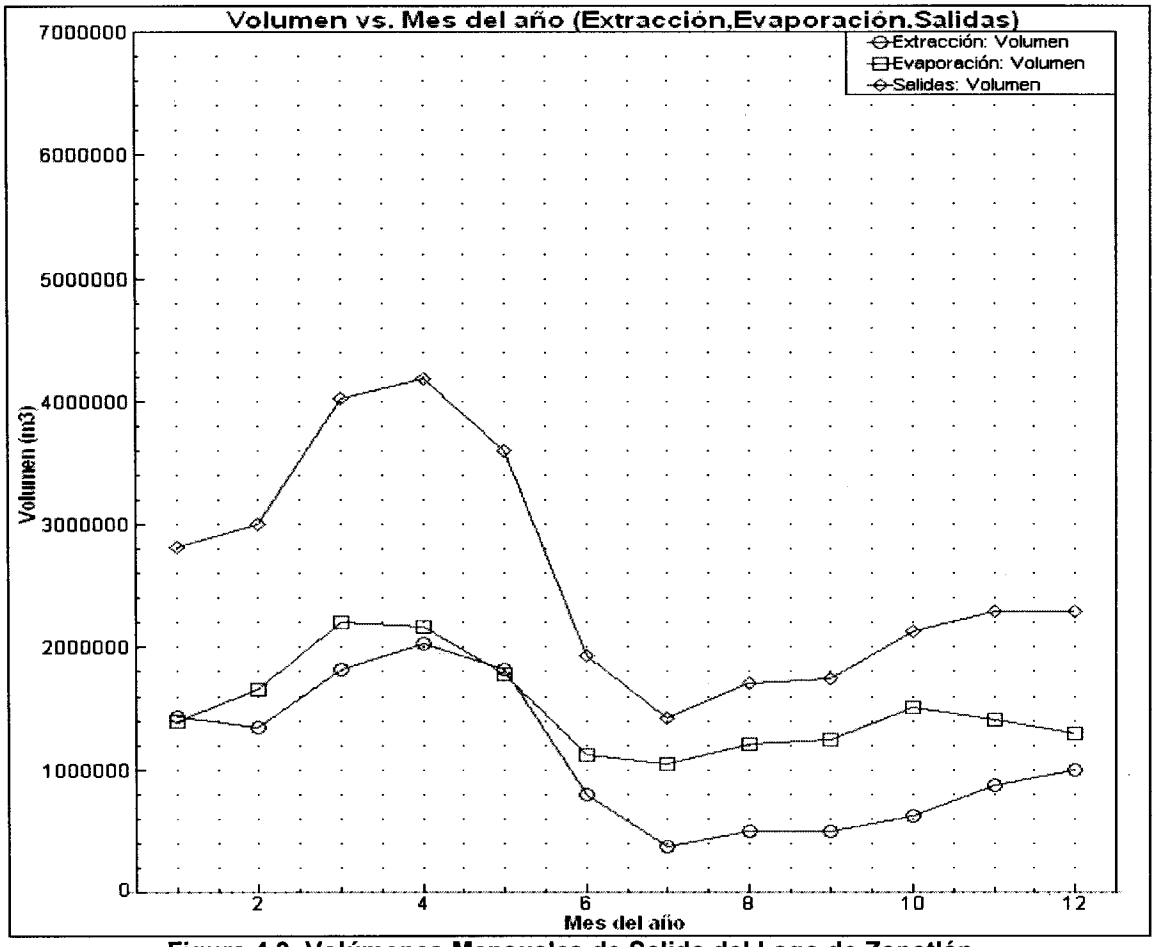

Figura 4.3. Volúmenes Mensuales de Salida del Lago de Zapotlán.

Aunque las tendencias son más marcadas para los volúmenes de entrada que para los de salida del lago, se observa que todos los volúmenes de entrada (los debidos a precipitación, escorrentías y descargas) aumentan durante la época de lluvias, como era de esperarse.

Antagónicamente, los volúmenes de salida aumentan durante la temporada de estiaje: en el caso de la evaporación, esto puede atribuirse a las temperaturas más elevadas y la disminución de la humedad en el aire (incrementándose así la fuerza motora que favorece la evaporación).

Por otra parte, en el caso de las extracciones, como ya mencionó anteriormente, su incremento durante la época de estiaje puede explicarse en función de que su uso es predominantemente como agua de riego agrícola: dado que la precipitación sobre las tierras de cultivo disminuye durante el estiaje, es necesario extraer más agua del lago para regar dichos terrenos.

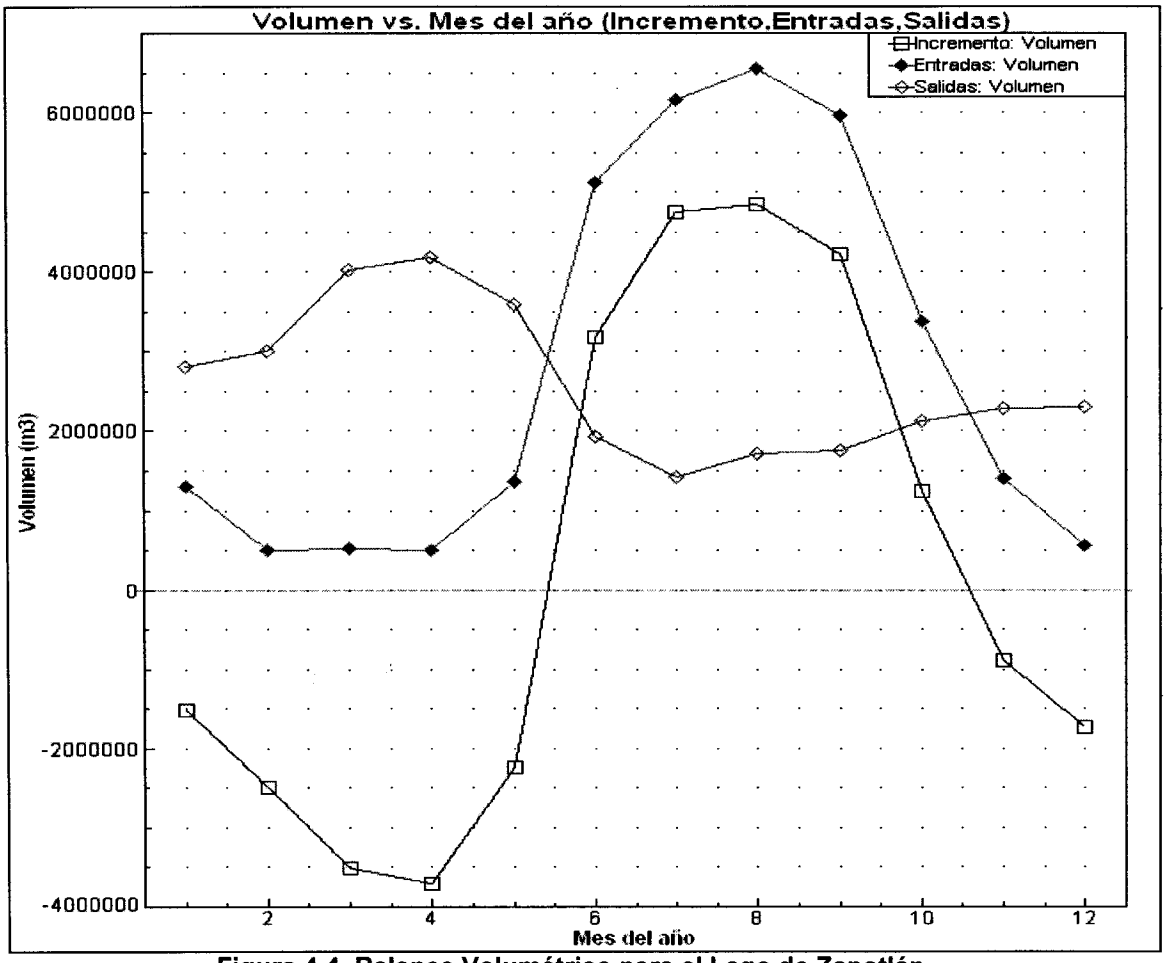

Figura 4.4. Balance Volumétrico para el Lago de Zapotlán.

4.1.3. Tiempos de Retención Hidráulica del Lago de Zapotlán

Para completar el modelo hidrológico del Lago de Zapotlán, sólo bastó hacer la caracterización de los tiempos de retención hidráulica según las salidas del lago τ_s para cada mes del año mediante el empleo de la Ecuación (4.7), razonada a partir de la Ecuación (3.26):

$$\tau_s = t\left(\frac{V}{\sum_j V_{s,j}}\right)_{mes} \tag{4.7}$$

donde t es igual al número de días en un mes, τ_s se calcula en *días* (aunque se recomienda transformar el valor a *meses* posteriormente), V es el volumen promedio almacenado en el vaso lacustre durante el mes de interés, y V_s es usado para indicar un volumen para cada salida j identificada previamente (es decir, evaporación y extracciones en el caso del Lago de Zapotlán).

El significado físico del tiempo de retención hidráulica τ_s (es decir, en función de las salidas del Lago de Zapotlán) se refiere al tiempo promedio en que permanece el agua dentro del vaso lacustre hasta su salida del lago ya sea por extracción o por evaporación. Los cálculos se incluyen en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Tiempos de Retención Hidráulica para el Lago de Zapotlán según sus Salidas.

Mes del año	Almacenamiento promedio del mes V (m^3)	Volúmenes de salida $\Sigma V_{s,j}$ (m^3)	Días por mes	Tiempo de retención		
				(días)	*(semanas)*	*(meses)*
Enero	28,050,830	2,817,396	31	308.6	44.1	10.3
Febrero	26,005,426	3,000,253	28	242.7	34.7	8.1
Marzo	23,255,758	4,020,910	31	179.3	25.6	6.0
Abril	19,497,233	4,190,839	30	139.6	19.9	4.7
Mayo	15,333,295	3,599,027	31	132.1	18.9	4.4
Junio	12,665,780	1,926,627	30	197.2	28.2	6.6
Julio	16,261,479	1,419,275	31	355.2	50.7	11.8
Agosto	20,949,155	1,710,590	31	379.6	54.2	12.7
Septiembre	25,863,169	1,749,529	30	443.5	63.4	14.8
Octubre	30,198,361	2,127,501	31	440.0	62.9	14.7
Noviembre	31,311,185	2,288,004	30	410.5	58.6	13.7
Diciembre	30,355,728	2,296,629	31	409.7	58.5	13.7
Promedio anual	*23,312,283*	*2,595,548*	*30*	272.7	39.0	9.1

Cabe aclarar que en la Tabla 4.12., el tiempo de retención hidráulica anual según las salidas del lago, se calculó aplicando la Ecuación (4.7) a los datos promedio de los doce meses del año en cuanto a volumen de almacenamiento, volúmenes de salida y días por mes (dichos datos promedio aparecen en caracteres cursivos en la Tabla 4.12.).

En la Tabla 4.12., pudo observarse que, según las salidas del Lago de Zapotlán, el tiempo de retención hidráulica calculado bajo una base promedio anual es de poco más de nueve meses, y que la variabilidad de los datos hidrométricos por mes es tal que para el tiempo de retención hidráulica según las salidas del lago se alcanza un mínimo en mayo, y un valor máximo durante el mes de septiembre. En todo caso, se recomienda más adecuado considerar el valor anual propuesto de $\tau_s \approx 9.1$ *meses* para el Lago de Zapotlán.

Por otra parte, en cuanto a la caracterización de los tiempos de retención hidráulica según las entradas al lago τ_e para cada mes del año, se utilizó la Ecuación (4.8):

$$\tau_e = t\left(\frac{V}{\sum_i V_{e,i}}\right)_{mes} \tag{4.8}$$

donde V_e es usado para indicar un volumen para cada entrada i identificada previamente (en otras palabras, descargas de aguas residuales, escorrentías y precipitación directa sobre el lago considerando el caso del Lago de Zapotlán).

El significado físico del tiempo de retención hidráulica τ_e (es decir, en función de las entradas al Lago de Zapotlán) se refiere al tiempo promedio en que será renovada totalmente el agua contenida en el lago por el agua que entre al vaso lacustre ya sea por descargas de aguas residuales, precipitación o escorrentías. Los cálculos se muestran en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Tiempos de Retención Hidráulica para el Lago de Zapotlán según sus Entradas.

Mes del año	Almacenamiento promedio del mes V (m^3)	Volúmenes de entrada $\Sigma V_{e,i}$ (m^3)	Días por mes	Tiempo de retención		
				(días)	*(semanas)*	*(meses)*
Enero	28,050,830	5,119,260	31	169.9	24.3	5.7
Febrero	26,005,426	6,165,712	28	118.1	16.9	3.9
Marzo	23,255,758	6,549,999	31	110.1	15.7	3.7
Abril	19,497,233	5,967,658	30	98.0	14.0	3.3
Mayo	15,333,295	3,374,918	31	140.8	20.1	4.7
Junio	12,665,780	1,406,797	30	270.1	38.6	9.0
Julio	16,261,479	568,007	31	887.5	126.8	29.6
Agosto	20,949,155	1,296,405	31	500.9	71.6	16.7
Septiembre	25,863,169	508,640	30	1525.4	217.9	50.8
Octubre	30,198,361	518,252	31	1806.4	258.1	60.2
Noviembre	31,311,185	492,131	30	1908.7	272.7	63.6
Diciembre	30,355,728	1,366,686	31	688.5	98.4	23.0
Promedio anual	*23,312,283*	*2,777,872*	*30*	253.0	36.1	8.4

Al igual que en el caso anterior, cabe hacer la aclaración que en la Tabla 4.13., el tiempo de retención hidráulica anual según las entradas al lago, se calculó aplicando la Ecuación (4.8) a los datos promedio de los doce meses del año en cuanto a volumen de almacenamiento, volúmenes de entrada y días por mes (dichos datos promedio también se escribieron en caracteres cursivos en la Tabla 4.13.).

De esta forma, en la Tabla 4.13. pudo observarse que, en función de las entradas al Lago de Zapotlán, el tiempo de retención hidráulica calculado bajo una base promedio anual es de casi ocho meses y medio, y que la variabilidad de los datos hidrométricos por mes es tal que para el tiempo de retención hidráulica según las entradas del lago se alcanza un mínimo en mayo, y un valor máximo durante el mes de septiembre. Al igual que en el caso anteriormente considerado, se recomienda más adecuado considerar el valor anual propuesto de $\tau_e \approx 8.4$ *meses* para el Lago de Zapotlán.

Asimismo, se advierte no perder de vista el significado físico de ambos tiempos de retención hidráulica, τ_s y τ_e, al momento de interpretar sus valores. En cualquier caso, el tiempo de retención hidráulica resulta excesivo, considerando que un lago sujeto a eutroficación típicamente posee un tiempo de retención hidráulica superior a apenas un mes, y que si el tiempo de retención hidráulica es mayor que tres días, pueden esperarse crecimientos excesivos de fitoplancton en el agua del lago (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989).

De esta forma, el modelo hidrológico del Lago de Zapotlán quedó completo mediante la conjunción del modelo morfométrico según las Ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.5), el balance volumétrico de acuerdo con la Ecuación (4.6), y el tiempo de retención hidráulica conforme a las Ecuaciones (4.7) y (4.8).

4.2. Análisis de la calidad del agua en el Lago de Zapotlán

En esta sección, se hizo el análisis de los valores de los parámetros de calidad del agua obtenidos mediante los monitoreos efectuados durante los meses de mayo y septiembre de 2003, así como la aplicación de los resultados obtenidos mediante el SIG construido en *RAISON*™.

En primera instancia, se hizo una revisión de la *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996*, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales, a fin de comparar sus límites diarios permisibles contra los valores obtenidos en los muestreos correspondientes a los puntos de monitoreo 10 y 11 (los canales de aguas negras municipales de Ciudad Guzmán y Gómez Farías, respectivamente).

Asimismo, cabe la aclaración de que de los parámetros muestreados, sólo los siguientes están considerados en la *NOM-001-SEMARNAT-1996*:

- Fósforo total.
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Nitrógeno orgánico total.
- Cromo total.
- Mercurio.
- Plomo.
- Arsénico.
- Organismos coliformes fecales.

La *NOM-001-SEMARNAT-1996* establece que, de acuerdo con la Ley Federal de Derechos en materia de agua, el Lago de Zapotlán es un embalse natural tipo B debido a su uso predominantemente agrícola (consúltese la Tabla 1.1. en el Capítulo 1 de esta tesis), y por tanto, los valores obtenidos en los monitoreos se compararon contra los límites diarios permisibles para este tipo de cuerpos receptores (véase la Tabla 4.14.).

Tabla 4.14. Cocientes de Incumplimiento de los Canales de Aguas Residuales de los Municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande* Respecto a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

NOM-001-SEMARNAT-1996			Cociente de Incumplimiento			
Determinaciones	Límite máximo	Unidades	Ciudad Guzmán		Gómez Farías	
			08/05/2003	19/09/2003	08/05/2003	19/09/2003
Fósforo total.	30	mg/L	1.60	N.E.	1.54	N.E.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	150	mg/L	7.88	8.24	9.09	7.25
Nitrógeno orgánico total.	60	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Cromo total.	1.50	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Mercurio.	0.02	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Plomo.	1.00	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Arsénico.	0.40	mg/L	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
Organismos coliformes fecales.	2,000	NMP/100mL	130	130	70	850

Observaciones:
De acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, el Lago de Zapotlán se clasificó como embalse natural Tipo B debido a su uso predominantemente agrícola, en concordancia con la Ley Federal de Derechos en materia de agua.
Los valores indicados corresponden a los límites diarios permisibles.
N.E.: No excedido.

En la Tabla 4.14., los cocientes de incumplimiento se calcularon de acuerdo con la Ecuación (3.28). Puede observarse que si bien no hay problemas en cuanto a metales pesados y metaloides como el arsénico, ambas descargas excedieron los límites permisibles de fósforo total en más del 50% en mayo de 2003. Asimismo, la excedencia es mucho más acentuada para el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno, así como de Coliformes Fecales. De hecho, los índices de incumplimiento tan elevados sugieren que las aguas eran vertidas al lago sin recibir tratamiento alguno, al menos durante el año 2003. Esta aseveración se confirmó dado que no hay niveles de cloro residual detectables de acuerdo a los resultados de los monitoreos contenidos en el Anexo D, lo cual

sugiere la ausencia de la operación unitaria de cloración como proceso de desinfección.

Por otra parte, las magnitudes de los cocientes de incumplimiento sugieren lo siguiente para el caso de las descargas hechas al Lago de Zapotlán:

1. El impacto principal de las descargas sobre el Lago de Zapotlán será hacia la salud humana de las personas que estén en contacto con el agua del lago (de acuerdo a los cocientes de incumplimiento tan elevado para el caso de los *organismos coliformes fecales*).
2. En segundo lugar, las descargas de aguas residuales impactarán sobre el incremento en la carga orgánica del lago y el agotamiento del oxígeno disuelto (debido a la magnitud de los cocientes de incumplimiento para el caso de la *demanda bioquímica de oxígeno*).
3. Finalmente, las descargas impactarán en menor medida (pero aún en forma considerable) al proceso de eutroficación del lago (indicado por los valores de los cocientes de incumplimiento para el *fósforo total*).

4.2.1. Análisis estadístico de parámetros de calidad del agua

El análisis estadístico de los datos de calidad del agua consistió en una primera fase en el cálculo de promedios geométricos de acuerdo con la Ecuación (3.29) a fin de encontrar las tendencias centrales de los datos con respecto a su variabilidad espacial (datos tomados en distintos puntos de monitoreo), así como a su variabilidad temporal (datos colectados en dos meses diferentes del año, uno bajo época de estiaje y el otro durante la época de lluvias).

Cabe señalar que en el caso de valores por debajo del límite detección, para fines de cálculo se empleó la mitad del límite de detección de la prueba para el manejo de los datos (Asante-Duah, D. K., 1993).

Así, para cada parámetro y en cada fecha de monitoreo, se calculó el promedio geométrico de las nueve estaciones dentro del lago (es decir, se usaron los promedios geométricos para suprimir la variación espacial entre los datos), de modo que se obtuvieron dos conjuntos de valores: uno para cada fecha de muestreo, pero ya sin poder hacer distinción entre las estaciones de monitoreo.

A partir de los promedios geométricos de los nueve puntos lacustres de monitoreo, se calcularon los promedios aritméticos entre los valores para ambas fechas de los monitoreos de calidad del agua del lago, así como su desviación estándar, para después calcular su coeficiente de variación (es decir, el cociente entre la desviación estándar y el promedio aritmético de los datos maestrales). Los resultados se resumen a continuación en la Tabla 4.15. Nótese que se han ordenado los parámetros en torno a su coeficiente de variación.

Tabla 4.15. Coeficientes de Variación de los Parámetros para los Puntos de Monitoreo Lacustres.

Determinaciones	Promedios Geométricos		Unidades	Promedio Aritmético	Desviación Estándar	Coeficiente de Variación	Promedio Geométrico Global
	Mayo 08	Septiembre 19					
Cloro residual.	0.05	0.05	mg/L	0.05	0.00	0.00	0.05
Nitratos.	0.03	0.03	mg/L	0.03	0.00	0.00	0.03
Cromo total.	0.05	0.05	mg/L	0.05	0.00	0.00	0.05
Plomo.	0.05	0.05	mg/L	0.05	0.00	0.00	0.05
Temperatura.	25.87	26.21	°C	26.04	0.24	0.01	26.04
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.28	252.46	mg/L	262.37	14.02	0.05	262.19
Fósforo disuelto total.	0.55	0.59	mg/L	0.57	0.03	0.06	0.57
pH.	8.81	9.79	U.P.	9.30	0.69	0.07	9.29
Arsénico.	0.06	0.05	mg/L	0.05	0.01	0.09	0.05
Dureza total.	205.63	178.19	mg/L como $CaCO_3$	191.91	19.40	0.10	191.42
Conductividad.	917.41	792.54	µh/cm	854.98	88.29	0.10	852.69
Salinidad.	917.41	792.54	µh/cm	854.98	88.29	0.10	852.69
Turbidez.	77.75	66.61	NTU	72.18	7.88	0.11	71.97
Sólidos disueltos totales.	435.76	357.00	mg/L	396.38	55.69	0.14	394.42
Fósforo total.	0.88	1.09	mg/L	0.98	0.15	0.15	0.98
Cloruros.	108.53	84.57	mg/L	96.55	16.95	0.18	95.80
Nitrógeno orgánico total.	1.02	1.34	mg/L	1.18	0.23	0.19	1.17
Mercurio.	0.01	0.01	mg/L	0.01	0.00	0.38	0.01
Oxígeno disuelto.	4.85	10.57	mg/L	7.71	4.04	0.52	7.16
Nitritos.	0.01	0.02	mg/L	0.01	0.01	0.79	0.01
Detección de *Escherichia coli*.	1.81	20.99	NMP/g	11.40	13.57	1.19	6.16
Organismos coliformes fecales.	1.81	27.38	NMP/100mL	14.60	18.08	1.24	7.04
Organismos coliformes totales.	6.38	207.38	NMP/100mL	106.88	142.13	1.33	36.36

A partir de los parámetros considerados en la Tabla 4.15., se eliminaron aquellos cuyo coeficiente de variación fuese igual a cero, o bien que en la mayoría de los puntos de monitoreo se hubiese mantenido por debajo del límite de detección. Así, se eliminaron de la batería de análisis estadísticos a los parámetros de: *cloro residual*, *nitratos*, *cromo total*, *plomo*, *arsénico* y *nitritos*. Nótese que se fusionaron a los parámetros de *conductividad* y *salinidad* por haber tenido los mismos valores en los diferentes monitoreos de calidad del agua considerados en esta tesis (véase el Anexo D). Asimismo, no se consideró en el análisis ni a la *temperatura* ni al *pH*, por tratarse de parámetros de estado del agua, y no directamente de contaminación.

El siguiente paso fue identificar a los parámetros restantes con un número consecutivo, tal y como se indica a continuación:

1. Cloruros.
2. Fósforo total.
3. Fósforo disuelto total.
4. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
5. Nitrógeno orgánico total.
6. Turbidez.
7. Dureza total.
8. Oxígeno disuelto.
9. Salinidad (conductividad).
10. Sólidos disueltos totales.
11. Organismos coliformes totales.
12. Organismos coliformes fecales.
13. Detección de *Escherichia coli.*

Después de haber identificado cada parámetro con un número diferente, el siguiente paso en el análisis fue obtener promedios geométricos a partir de los datos originales del Anexo D para suprimir esta vez la variación temporal, de modo que para cada parámetro se obtuvieron nueve valores (uno por cada punto de muestreo), pero sin poder distinguir esta vez entre la fecha del muestreo. Los resultados se resumen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Promedios Geométricos para Suprimir la Variación Temporal de los Datos de Calidad del Agua.

Determinaciones de Calidad del Agua			Promedios geométricos según punto de monitoreo								
No.	Parámetro	Unidades	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Cloruros.	mg/L	97.55	93.57	94.20	96.09	95.26	96.19	95.87	95.23	98.39
2	Fósforo total.	mg/L	0.84	0.84	0.88	0.91	0.85	1.10	0.98	1.59	0.99
3	Fósforo disuelto total.	mg/L	0.43	0.45	0.56	0.47	0.40	0.71	0.62	0.93	0.74
4	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	mg/L	335.24	232.26	212.02	307.25	232.26	259.67	268.19	232.26	307.25
5	Nitrógeno orgánico total.	mg/L	1.13	1.19	1.07	1.19	1.33	1.13	0.98	1.24	1.26
6	Turbidez.	NTU	77.48	62.08	64.64	88.90	73.90	79.66	59.03	65.04	82.92
7	Dureza total.	mg/L como $CaCO_3$	192.37	191.56	192.36	187.21	197.83	189.79	193.08	193.79	185.07
8	Oxígeno disuelto.	mg/L	7.73	5.91	5.97	7.61	8.32	6.36	6.98	7.64	8.46
9	Salinidad (conductividad).	µh/cm	860.55	854.99	857.44	857.69	852.06	849.13	852.37	845.68	844.48
10	Sólidos disueltos totales.	mg/L	397.44	394.88	396.64	396.99	394.43	392.97	395.33	390.89	390.25
11	Organismos coliformes totales.	NMP/100mL	22.80	30.33	36.33	57.97	17.89	43.24	109.54	16.125	55.86
12	Organismos coliformes fecales.	NMP/100mL	2.83	4.47	4.47	8.25	3.00	8.94	36.06	6.3246	14.87
13	*Escherichia coli.*	NMP/g	2.83	4.47	4.47	5.83	2.00	8.94	36.06	4.4721	13.49

Utilizando el número de identificación de cada parámetro, se construyó después una matriz de comparación en la cual se registraron los coeficientes de correlación de Pearson *r*, mismos que se obtuvieron de la confrontación directa entre los conjuntos de datos de la Tabla 4.16. correspondientes a los diferentes parámetros de calidad del agua. La matriz de comparación se muestra en la Tabla 4.17.

El criterio empleado para distinguir aquellos parámetros entre los cuales pudiese existir relación fue que sus coeficientes de determinación fuesen iguales o mayores que 0.8, es decir $r^2 \geq 0.8$, lo cual equivale a que los valores absolutos

de sus coeficientes de correlación fuesen iguales o superiores a la raíz cuadrada de 0.8, es decir, aproximadamente 0.8944.

Tabla 4.17. Matriz de Comparación de Coeficientes de Correlación de Pearson *r*.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	X	0.0076	0.1838	0.8496	0.0978	0.6522	-0.5139	0.6856	-0.2382	-0.2506	0.2131	0.2212	0.1978
2	X	X	0.8974	-0.2226	0.1352	-0.1620	0.0511	0.1351	-0.6580	-0.6595	-0.1633	0.0473	0.0102
3	X	X	X	-0.1513	-0.0173	-0.1253	-0.2217	0.0768	-0.7945	-0.7858	0.0655	0.2469	0.2193
4	X	X	X	X	-0.0357	0.6650	-0.5539	0.5105	0.1893	0.1564	0.2453	0.1507	0.1302
5	X	X	X	X	X	0.4156	0.0537	0.5974	-0.3699	-0.4539	-0.6354	-0.5744	-0.6173
6	X	X	X	X	X	X	-0.5856	0.5111	0.0095	-0.0220	-0.1101	-0.2906	-0.3319
7	X	X	X	X	X	X	X	-0.0469	0.1692	0.2094	-0.3291	-0.1431	-0.1148
8	X	X	X	X	X	X	X	X	-0.3219	-0.3236	-0.0833	0.0153	-0.0401
9	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.9786	-0.0531	-0.2552	-0.2237
10	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.0961	-0.1064	-0.0772
11	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.9391	0.9335
12	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.9961
13	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

En la Tabla 4.17., se han sombreado aquellos coeficientes de correlación de Pearson que satisfacen la condición $|r| \geq 0.8944$. De esta forma, se consideró que podría existir correlación entre:

2 y 3: *Fósforo total* y *Fósforo disuelto total.*
9 y 10: *Salinidad (conductividad)* y *Sólidos disueltos totales.*
11 y 12: *Organismos coliformes totales* y *Organismos coliformes fecales.*
11 y 13: *Organismos coliformes totales* y *Escherichia coli.*
12 y 13: *Organismos coliformes fecales* y *Escherichia coli.*

A continuación, la Tabla 4.18. resume los coeficientes constantes de la regresión lineal representativa de la correlación, de la forma:

$$y = mx + b \tag{4.9}$$

donde y es la variable dependiente, y x es la variable independiente en la regresión lineal (las unidades de las variables son las mismas que poseen los parámetros en la Tabla 4.15). En la página siguiente, se incluye la Figura 4.5., con las gráficas correspondientes a los modelos lineales de la Tabla 4.18.

Tabla 4.18. Coeficientes Constantes de las Regresiones Lineales de Parámetros de Calidad del Agua del Lago de Zapotlán.

Parámetros	y	x	m	b	r	r^2
	3	2	0.6643	-0.0724	0.8974	0.8053
	10	9	0.4584	3.5249	0.9786	0.9577
	12	11	0.3386	-4.7641	0.9391	0.8819
	13	11	0.3420	-5.6514	0.9335	0.8715
	13	12	1.0122	-0.8592	0.9961	0.9922

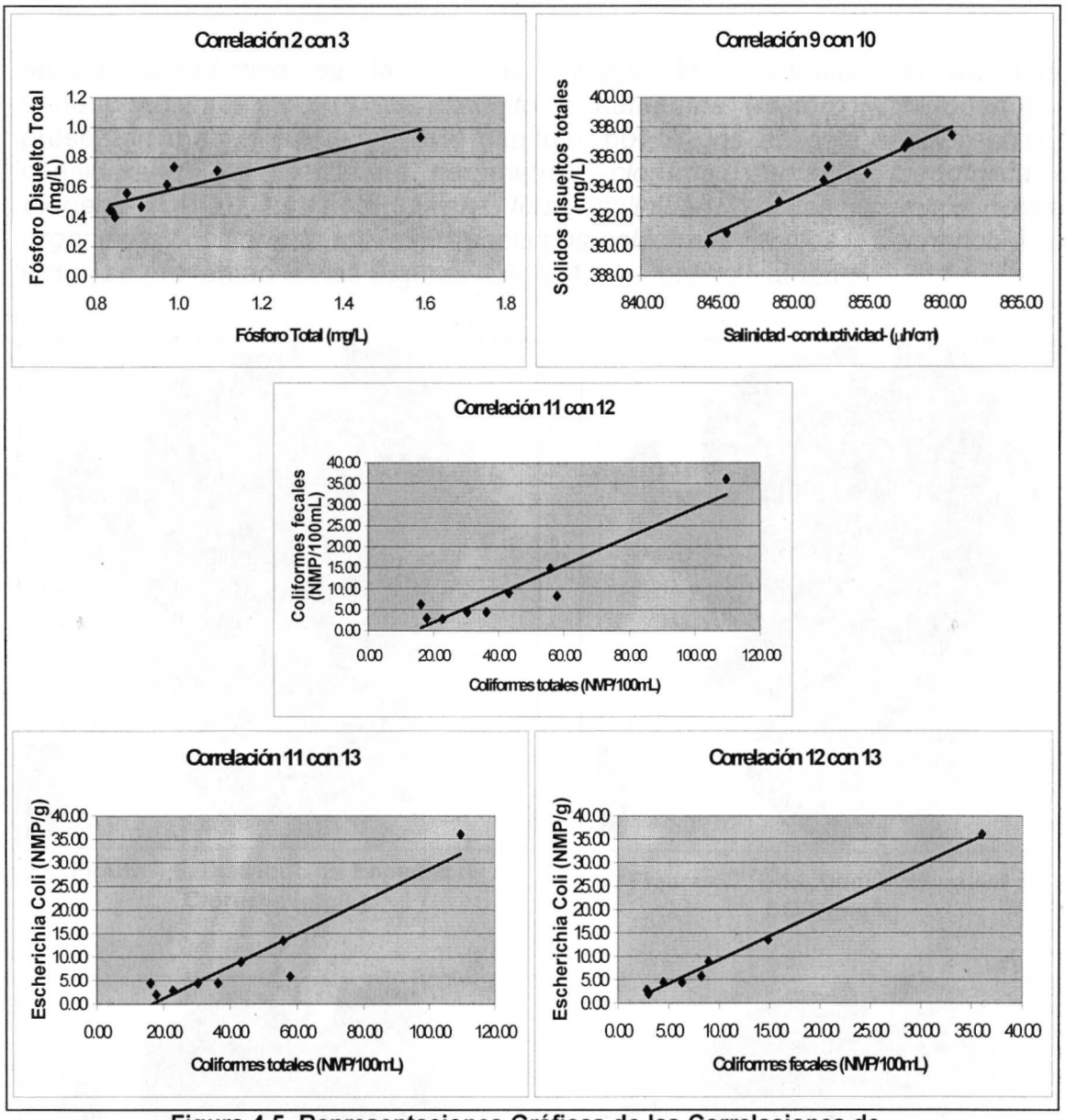

Figura 4.5. Representaciones Gráficas de las Correlaciones de Parámetros de Calidad del Agua.

4.2.2. Distribución espacial de contaminación del agua

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos en *RAISON*^{TM} tras la modelación de la calidad del agua del Lago de Zapotlán. Sólo se presentan las modelaciones correspondientes a los 13 parámetros considerados para el

análisis estadístico de la sección anterior. No obstante, los resultados correspondientes a *oxígeno disuelto* y *nutrientes* (*fósforo* y *nitrógeno*) se presentan más adelante en este capítulo, por lo que en esta sección sólo se considerarán los siguientes parámetros: *cloruros*, *demanda bioquímica de oxígeno* (DBO), *turbidez*, *dureza total*, *salinidad*, *sólidos disueltos totales*, *organismos coliformes totales*, *organismos coliformes fecales* y *Escherichia coli*. Éstos se presentan en las Figuras 4.6. a 4.14., respectivamente.

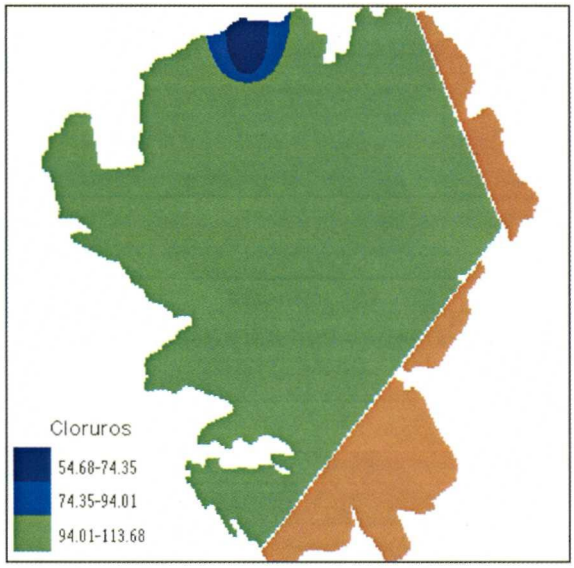

Figura 4.6. Distribución Espacial de Cloruros (mg/L).

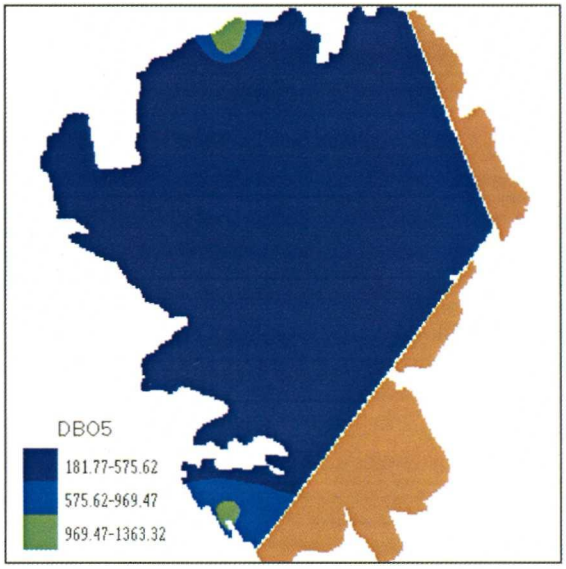

Figura 4.7. Distribución Espacial de DBO (mg/L).

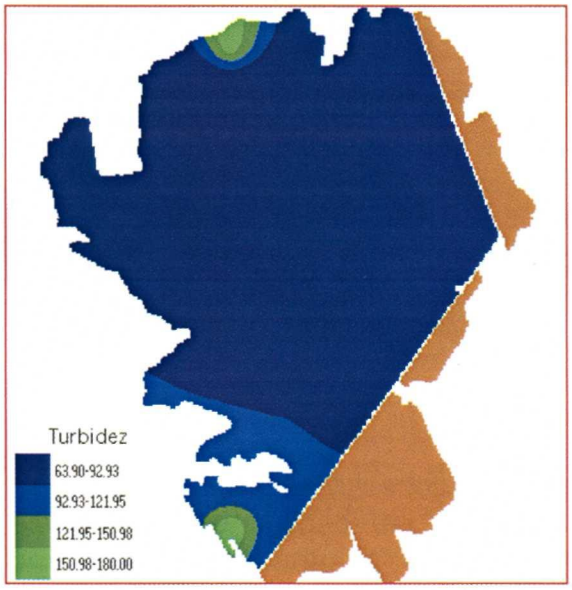

Figura 4.8. Distribución Espacial de Turbidez (NTU).

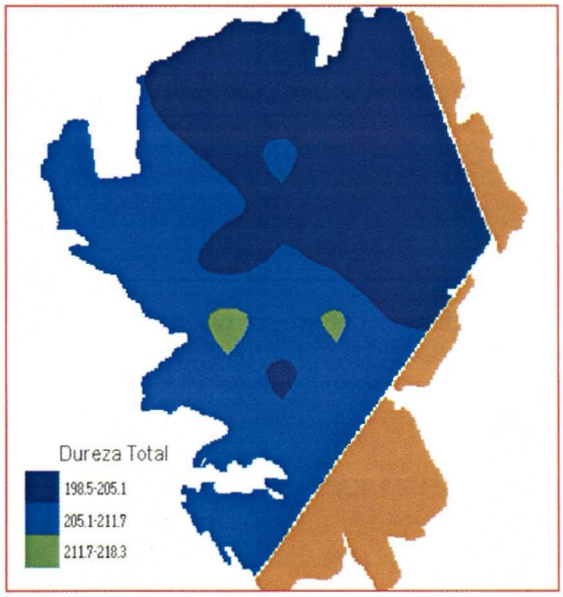

Figura 4.9. Distribución Espacial de Dureza Total (mg/L como $CaCO_3$).

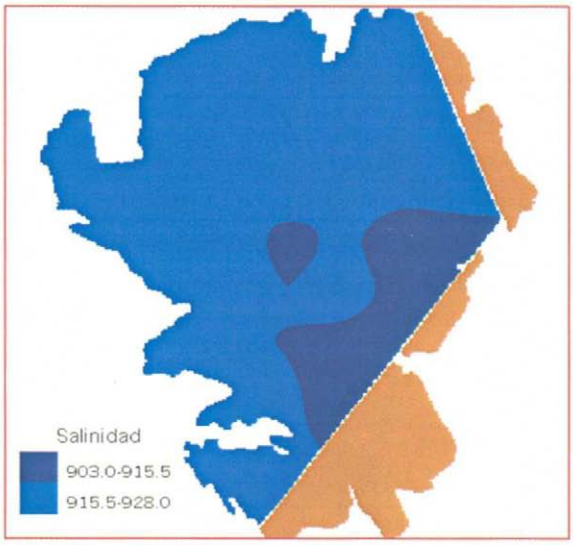

Figura 4.10. Distribución Espacial de Salinidad (µh/cm).

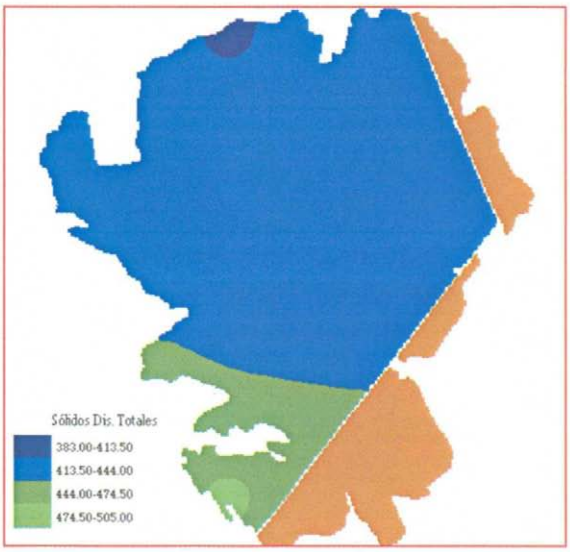

Figura 4.11. Distribución Espacial de Sólidos Disueltos Totales (mg/L).

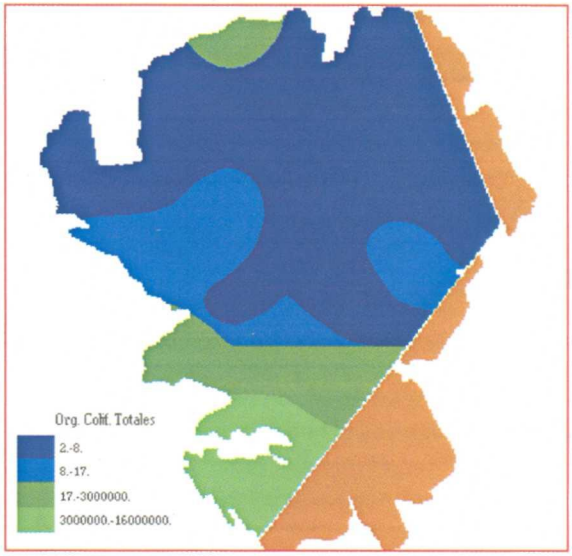

Figura 4.12. Distribución Espacial de Coliformes Totales (NMP/100mL).

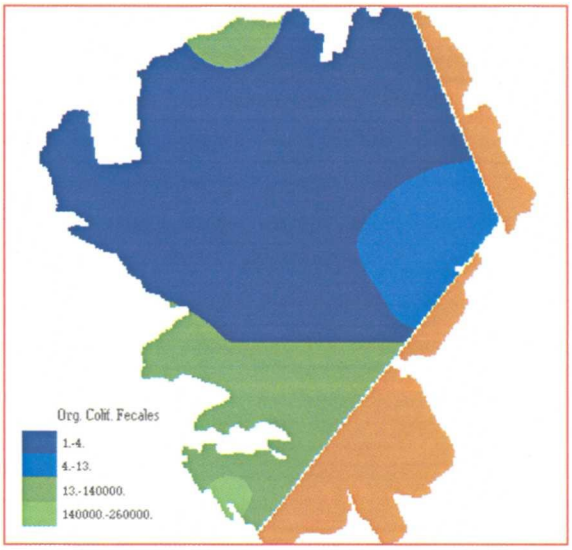

Figura 4.13. Distribución Espacial de Coliformes Fecales (NMP/100mL).

Una vez presentados los resultados de las distribuciones espaciales de los parámetros de calidad del agua, la Tabla 4.19. registra las observaciones principales en cuanto la dirección en que se incrementan sus magnitudes respectivas.

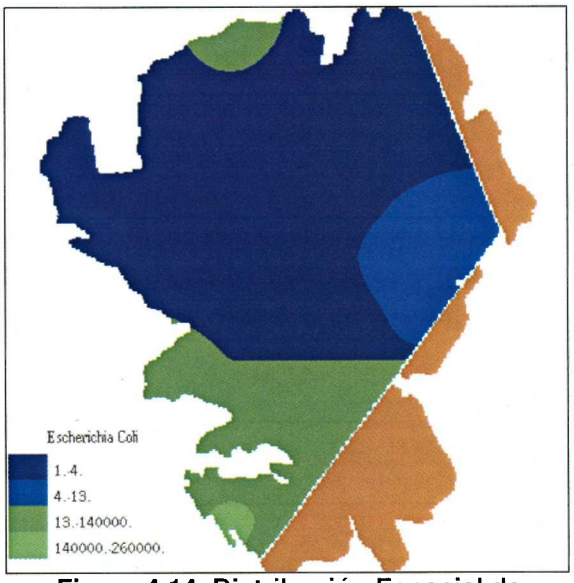

Figura 4.14. Distribución Espacial de *Escherichia Coli* (NMP/g)

Tabla 4.19. Direcciones de Incremento en Valores de Parámetros de Calidad del Agua.

Distribución espacial	Dirección y sentido de incremento
Distribución Espacial de Cloruros.	Constante, excepto en las descargas de aguas residuales, donde disminuye.
Distribución Espacial de DBO.	Constante, excepto en las descargas de aguas residuales, donde aumenta.
Distribución Espacial de Turbidez.	Constante, excepto en las descargas de aguas residuales, donde aumenta.
Distribución Espacial de Conductividad.	Hacia el noroeste.
Distribución Espacial de Dureza Total.	Hacia el sudoeste, teniendo unos máximos locales en el centro.
Distribución Espacial de Sólidos Disueltos Totales.	Hacia el sur.
Distribución Espacial de Coliformes Totales.	Hacia el sur, con valores máximos en las descargas de aguas residuales.
Distribución Espacial de Coliformes Fecales.	Hacia el sur, con valores máximos en las descargas de aguas residuales.
Distribución Espacial de *Escherichia Coli*.	Hacia el sur, con valores máximos en las descargas de aguas residuales.

4.2.3. Tendencias espaciales de anoxia

Resulta de especial interés considerar la distribución espacial de los niveles de oxígeno disuelto en la Laguna de Zapotlán, debido a que las zonas

anóxicas carecerán de producción biológica (pesquera), y degradarán su calidad más rápidamente que otras zonas. Las zonas anóxicas podrían deberse a la acumulación de plantas muertas en los sedimentos, y a la recepción directa de descargas con alta carga orgánica, entre otras causas.

No obstante, antes de determinar la distribución espacial de oxígeno disuelto dentro del Lago de Zapotlán, fue necesario calcular el nivel teórico de saturación dada la altitud del espejo de agua (redondeada a 1,500msnm) y la temperatura promedio del agua (26.04°C, de acuerdo con la Tabla 4.15.).

Considerando únicamente la temperatura anterior, se calculó el valor de saturación al nivel del mar en 8.11mg/L. Sin embargo, fue necesario corregir este valor para la presión atmosférica sobre el Lago de Zapotlán. Tras usar las Ecuaciones (3.30) a (3.35) de la Sección 3.2.4., se determinó que a una altitud de 1,500msnm, la presión atmosférica típica es de aproximadamente 641mmHg (0.843atm). Así, el valor teórico de saturación de oxígeno disuelto para el Lago de Zapotlán se calculó en 6.79mg/L (no se consideró la salinidad del agua del lago).

No obstante, al analizar la Tabla 4.15., se encontró un valor de sobresaturación para el promedio geométrico global del lago (7.16mg/L). Por tal razón, se analizaron los promedios geométricos de dicha Tabla 4.15. para las distintas fechas de monitoreo, encontrándose un valor de 4.85mg/L para el caso de mayo de 2003 (representativo para el estiaje), y 10.57mg/L para el caso de noviembre de 2003 (representativo para la época de lluvias).

Llamó la atención la sobresaturación tan extrema para el caso del promedio geométrico del oxígeno disuelto para el mes de noviembre. Por esta razón, se revisaron los valores particulares para los nueve puntos de monitoreo dentro del lago para tal fecha (véase el Anexo D), confirmándose la sobresaturación en ocho de los nueve puntos identificados. Esta sobresaturación pudo deberse, en primera instancia, a la turbulencia del lago observada durante la época de lluvias (con olas estimadas en 40cm de altura), aunque podría tratarse con mayor plausibilidad de un error consistente en la toma de muestras y/o el análisis en laboratorio. Por lo tanto, no fueron considerados los valores de concentración de oxígeno disuelto del mes de noviembre en el análisis espacial reportado en esta sección.

Considérese a continuación la Figura 4.15., para analizar la distribución espacial del oxígeno disuelto en el Lago de Zapotlán. Cabe señalar que la Figura 4.15. fue generada a partir de los valores de oxígeno disuelto obtenidos durante el muestreo de mayo de 2003, es decir, sin haber considerado los muestreos de noviembre de 2003.

De tal forma, en la Figura 4.15. pudo apreciarse que el oxígeno disuelto tiende a incrementarse hacia el norte del lago (hacia la zona con mayor

superficie libre del lago), con excepción del punto de descarga de las aguas negras del municipio de *Gómez Farías*. En general, el oxígeno disuelto tiene a incrementarse hacia las zonas de mayor superficie libre del lago, de acuerdo con la Figura 4.15.

En general, se aprecia un déficit en la concentración de oxígeno disuelto con respecto al valor teórico de saturación de 6.79mg/L.

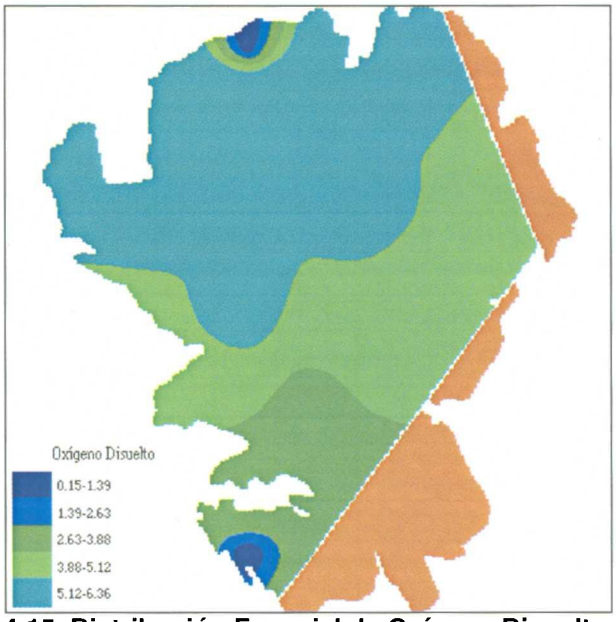

Figura 4.15. Distribución Espacial de Oxígeno Disuelto (mg/L).

4.3. La eutroficación del Lago de Zapotlán

El Lago de Zapotlán sufre de un proceso de eutroficación el cual afecta directamente a su calidad del agua y la biota residente en sus aguas. Por lo tanto, merece especial atención la consideración de la eutroficación dentro de este trabajo de investigación.

4.3.1. Nutrientes limitantes en el lago

El concepto de nutriente limitante consiste en reconocer si alguno de los nutrientes principales (fósforo y nitrógeno) se encuentra por debajo de la relación

de nutrientes en la biomasa vegetal. Es decir, si alguno de los nutrientes no está en concentraciones suficientes como para permitir el desarrollo máximo de biomasa, éste se considerará como el nutriente *limitante*, pues *limitará* el desarrollo de vegetación en el lago.

Chapra, S.C. (1997), indica que si la razón de nitrógeno a fósforo en el agua de un lago es menor a 7.2, entonces el nitrógeno será el nutriente limitante, y que si es superior a 7.2, entonces será el fósforo el nutriente limitante.

Para el caso del lago de Zapotlán, se analizaron los valores de los parámetros de fósforo total y nitrógeno orgánico total, y se compararon en cada uno de los puntos y fechas de monitoreo con respecto al criterio ya mencionado, obteniéndose los resultados descritos en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Nutrientes Limitantes en el Lago de Zapotlán.

Punto de Monitoreo	Mayo 08, 2003		Septiembre 19, 2003		Promedio Geométrico	
	Razón N:P	Nutriente limitante	Razón N:P	Nutriente limitante	Razón N:P	Nutriente limitante
1	1.2	Nitrógeno	1.4	Nitrógeno	1.3	Nitrógeno
2	1.2	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno	1.4	Nitrógeno
3	1.1	Nitrógeno	1.5	Nitrógeno	1.3	Nitrógeno
4	1.2	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno	1.4	Nitrógeno
5	1.6	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno
6	1.2	Nitrógeno	1.4	Nitrógeno	1.3	Nitrógeno
7	1.1	Nitrógeno	1.3	Nitrógeno	1.2	Nitrógeno
8	1.4	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno	1.5	Nitrógeno
9	1.4	Nitrógeno	1.6	Nitrógeno	1.5	Nitrógeno
Lago	*1.3*	*Nitrógeno*	*1.5*	*Nitrógeno*	*1.4*	*Nitrógeno*
10	31.9	Fósforo	35.6	Fósforo	33.7	Fósforo
11	34.2	Fósforo	37.8	Fósforo	35.9	Fósforo
Aguas Residuales	*33.0*	*Fósforo*	*36.7*	*Fósforo*	*34.8*	*Fósforo*

Llama la atención que aún cuando las descargas de aguas residuales son limitadas en fósforo, el nutriente limitante en el lago fue en todos los casos el nitrógeno. Cabe señalarse que los criterios de identificación del nutriente limitante en un cuerpo de agua están concebidos para lagos templados, por lo que su interpretación debe hacerse con cuidado para el caso de lagos en latitudes tropicales (es decir, entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio), pues en los últimos las condiciones de iluminación, temperatura, estratificación y resuspensión son diferentes a las de los lagos templados. Esto provoca diferentes eficiencias en la fotosíntesis en el fitoplancton y plantas acuáticas, resultando en diferentes proporciones de nutrientes en la biomasa vegetal que los esperados teóricamente para lagos templados. Por lo tanto, en el caso del Lago de Zapotlán, más que sugerirse una deficiencia de nitrógeno de acuerdo con la Tabla 4.20., el que tal nutriente sea limitante para el lago es un indicador de que hay una excedencia de fósforo en el cuerpo de agua.

4.3.2. Distribución espacial de nutrientes en el lago

En esta sección se incluyen los resultados de la modelación de los niveles de fósforo total, fósforo disuelto total y nitrógeno orgánico total, mostrados en las Figuras 4.16. a 4.18.

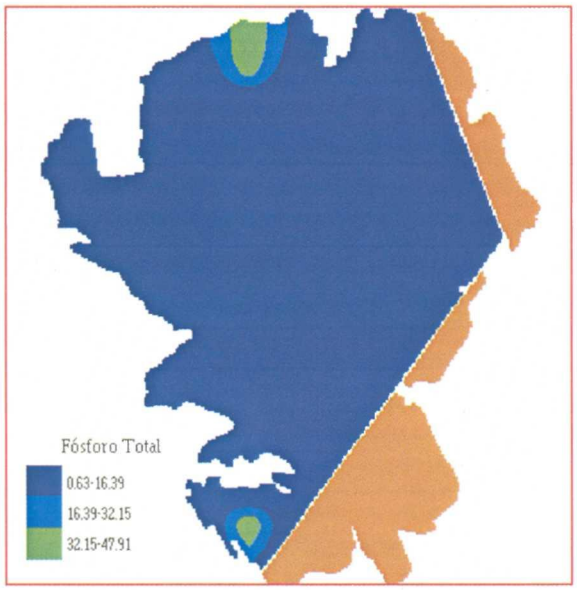

Figura 4.16. Distribución Espacial de Fósforo Total (mg/L).

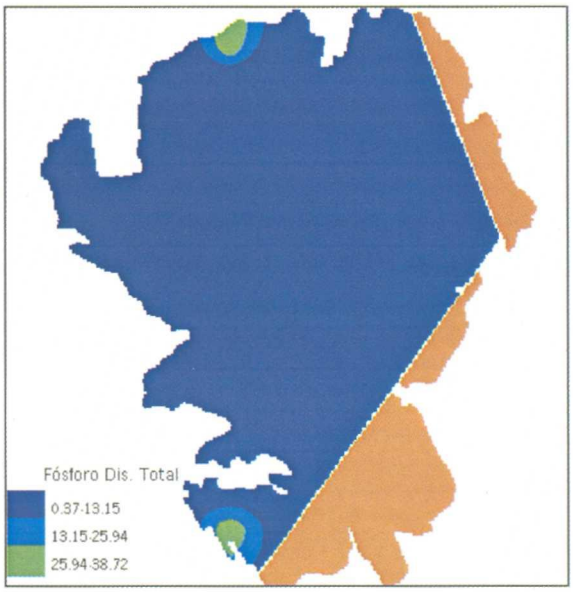

Figura 4.17. Distribución Espacial de Fósforo Disuelto Total (mg/L).

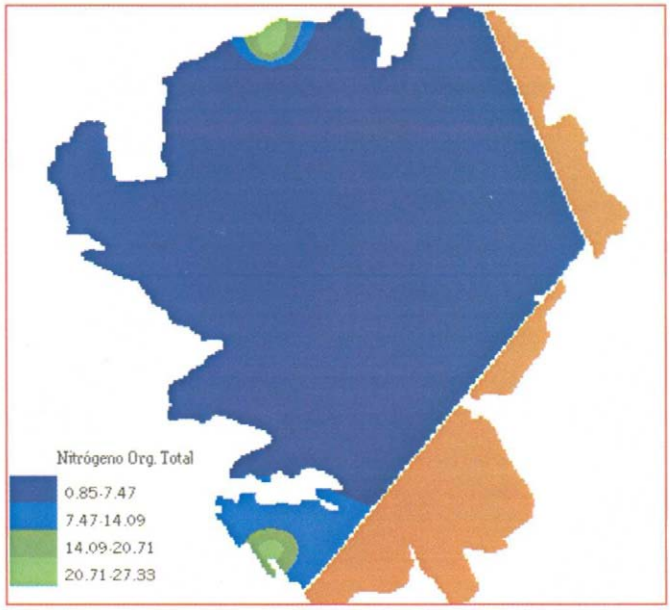

Figura 4.18. Distribución Espacial de Nitrógeno Orgánico Total (mg/L).

Puede apreciarse que la distribución es prácticamente la misma en todos los casos: concentraciones razonablemente uniformes en el cuerpo del lago, con niveles máximos en los puntos de descarga.

4.3.3. Solución del modelo de eutroficación

Las variables contenidas en las Ecuaciones (3.36) a (3.57) exigen el uso de datos particulares para el Lago de Zapotlán a fin de ofrecer una modelación consistente con la eutroficación de dicho cuerpo de agua. Sin embargo, la falta de datos e información ambiental del Lago de Zapotlán impidió cubrir todo el espectro de datos de alimentación al modelo de la Sección 3.2.5. con información específica para dicho cuerpo lacustre.

Además de datos particulares para el lago de Zapotlán (reportados en la literatura o derivados de muestreos particulares), fue necesario en algunos casos emplear datos típicos para lagos templados -por no existir en la literatura datos para lagos tropicales-, en otros casos se recurrió al cálculo indirecto de datos a partir de información del Lago de Zapotlán y en otros casos se hicieron estimaciones basadas en información para otros lagos o en su similitud con otros parámetros. Estos conjuntos de datos se incluyen en el Anexo G al final de la tesis.

En cuanto al horizonte de tiempo escogido para la solución del problema, se seleccionaron 30 días, puesto que sería un error considerar como constantes las tasas de depredación durante un tiempo mayor, dado que no se estarían considerando los ciclos biológicos de las especies involucradas.

Se ha presentado un escenario de modelación ficticio para el Lago de Zapotlán debido al uso de datos típicos y estimados para fines de cálculo. Estos datos no reflejan la situación real particular del lago, pero sí en cambio permiten reconocer las tendencias aceleradas de las especies biológicas y químicas en un lago eutroficado. De esta forma, los resultados son consistentes en cuanto a sus tendencias esperadas, aunque ocurren en un lapso de tiempo mucho menor que lo observado en otros cuerpos de agua con altos niveles de eutroficación.

En general, se aprovechó la estructura del modelo para analizar el caso en que hubiera una sobrepoblación de peces grandes con muy poca pesca y baja tasa de mortalidad. En la Figura 4.19., pudo observarse que los mayores cambios en los niveles de todas las especies químicas o biológicas involucradas se registraron durante los primeros tres días (nótese que el modelo simula la

concentración de especies en el lago, no el número de individuos de cada especie dentro del vaso lacustre).

Resulta interesante hacer notar que al inicio, la concentración de peces grandes crecen en forma tal que agotan sus recursos alimenticios (peces pequeños, fitoplancton y zooplancton), hasta que comienza a disminuir una vez que se ha consumido todo el alimento. Por su parte, la concentración de peces pequeños, aun cuando al inicio presentó un ligero incremento, disminuyó drásticamente sus niveles al mismo tiempo en que se agotaron sus reservas de alimento (fitoplancton y zooplancton) debido a la excesiva depredación de los peces grandes.

Por otra parte, los niveles de nitrógeno amoniacal fueron sintetizados rápidamente al integrarse a los organismos muertos dentro del lago, y transformados en nitrógeno de nitratos al mismo tiempo.

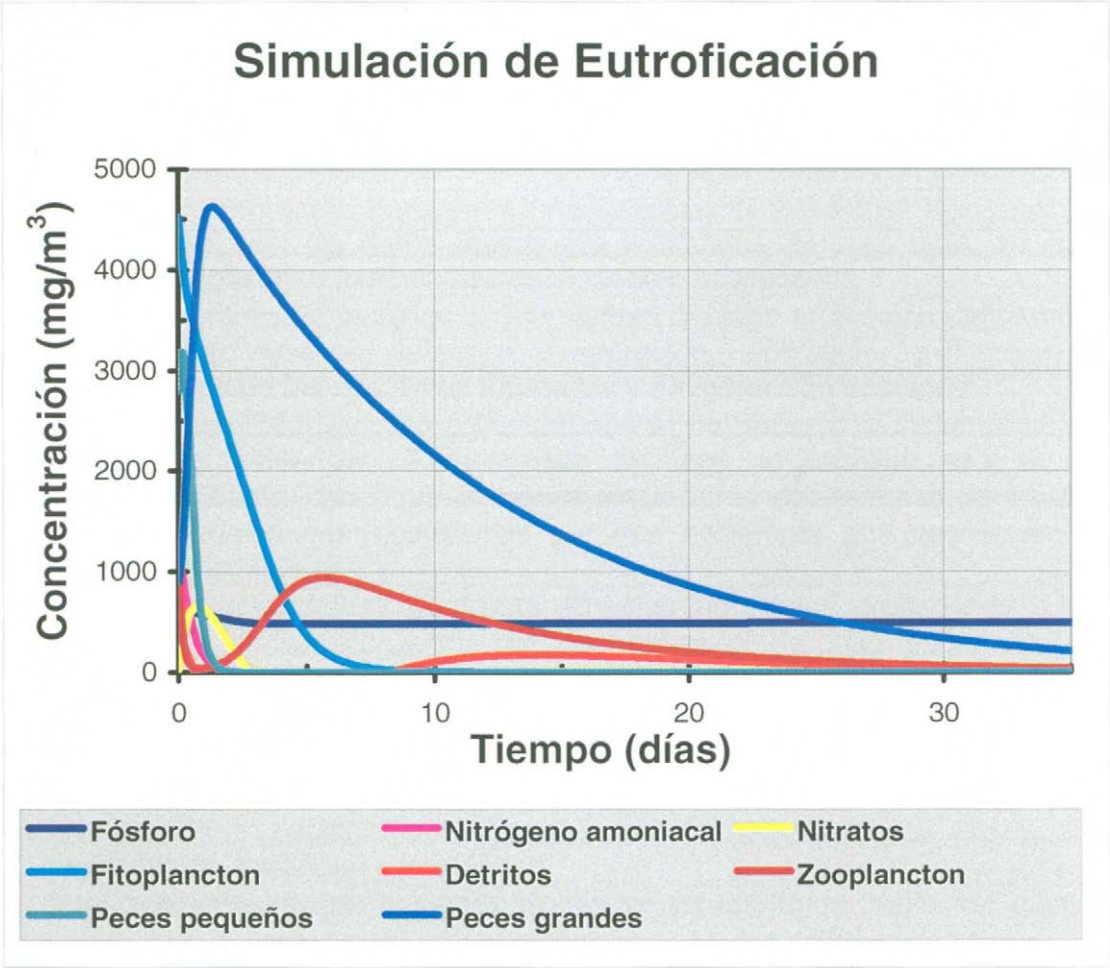

Figura 4.19. Solución Hipotética del Modelo de Eutroficación.

Asimismo, la introducción de nutrientes en el lago incrementó en un principio la actividad biológica, hasta que se rebasó la capacidad de carga y autodepuración del lago, y empezó a acelerarse entonces la disminución de l concentración de las especies en sobrepoblación (es decir, la muerte de los individuos de tales especies). Su muerte exigió la rápida oxidación de los restos orgánicos (incrementando los niveles de nitratos), hasta agotar el oxígeno disuelto y con ello, acabar con la capacidad de producción biológica dentro del lago.

En el caso específico del Lago de Zapotlán, cabe resaltar que la turbiedad del lago (representada indirectamente por los altos niveles de clorofila y la escasa profundidad calculada del disco Secchi) dificulta el paso de la luz en forma tal que impide la reproducción exitosa del fitoplancton (indicado consistentemente por la solución del modelo según la Figura 4.19.). Al haber desaparecido el fitoplancton, comenzó a disminuir la concentración de las demás especies que dependen de éste para su alimentación, hasta desaparecer, y con ello, generar una reacción en cadena a lo largo de los diferentes niveles tróficos.

Por otra parte, en cuanto al uso del modelo, se reconoce su utilidad como herramienta para la comprensión del comportamiento de los factores y especies involucrados en el proceso de eutroficación. Sin embargo, en su estado actual no puede considerarse como herramienta de predicción veraz para el Lago de Zapotlán, debido al uso de datos típicos y no particulares para dicho cuerpo de agua.

Además del uso de datos típicos y/o estimados para el lago, se han encontrado las siguientes deficiencias en el modelo propuesto:

- No considera las variaciones en el volumen del lago en función del tiempo. Estas variaciones se deben a evaporación, infiltración, exfiltración y fluctuaciones en las corrientes tributarias y de extracción del lago.
- Supone mezclado perfecto e instantáneo al no hacer una distribución de tiempos de residencia. Para el caso del Lago de Zapotlán, este es un punto importante, dado que al menos existen tres subsistemas dentro del lago, los cuales son delimitados por dos carreteras que atraviesan el espejo de agua.
- En general, el modelo no incorpora aspectos hidráulicos, destacándose los dos puntos anteriores, junto con los patrones de flujo debidos a la batimetría del lago.
- No incorpora ecuaciones específicas para modelar niveles de oxígeno disuelto en relación con las otras variables.
- No considera variaciones en la temperatura del agua en función del tiempo.
- No admite variaciones en función del tiempo para las tasas de depredación, natalidad y mortalidad.
- Integra el conjunto de especies biológicas de los lagos dentro de cuatro categorías únicamente, ignorando diferencias en sus ciclos biológicos.

5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo, a partir de los resultados obtenidos en la investigación (véase el Capítulo 4), se han identificado las siguientes alternativas disponibles para elaborar una estrategia de control de la eutroficación en el Lago de Zapotlán, así como por otra parte, sugerencias de los trabajos posteriores de investigación en torno a la problemática del lago a fin de complementar los esfuerzos llevados a cabo en el desarrollo de esta tesis.

5.1. Opciones de prevención y control de la eutroficación en el Lago de Zapotlán

Existen diversas técnicas disponibles para la prevención y el control de la eutroficación en lagos y cuerpos lénticos en general (consúltese la Sección 2.6. en el Capítulo 2 de esta tesis). La aplicación y conveniencia de éstas depende de la configuración misma del vaso lacustre y de la cuenca, así como de su *factibilidad*[14] y de los *beneficios* asequibles en el entorno y dentro del lago mismo.[15]

Para la prevención y control del fenómeno de eutroficación en el caso del Lago de Zapotlán, se recomienda inicialmente considerar combinaciones de las siguientes opciones técnicas (consúltese el Anexo E), las cuales deben elegirse con cuidado tomando en cuenta sus posibles efectos secundarios en la calidad del agua:

1. Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.
2. Construcción de trincheras de escurrimiento.
3. Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.
4. Cosecha de plantas y algas en el lago.
5. Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.
6. Canalización y derivación de aguas negras y residuales.

[14] Entendida como la conjunción de la disponibilidad de recursos y tiempo, así como la disponibilidad de las técnicas necesarias para su implementación.
[15] Considerándose beneficios de corte ambiental, económico, político y social, por ejemplo.

7. Incremento en los flujos de salida del lago.
8. Dragado de sedimentos.
9. Control en los usos del suelo de la cuenca.
10. Trituración de lirio y/o tule.
11. Control químico de algas y maleza.
12. Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.
13. Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.
14. Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.
15. Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.

Aun cuando la metodología de evaluación descrita en el Anexo E se ha basado en el cálculo de índices propuestos por el autor de esta tesis, su aplicación ha probado ser útil y sencilla para incorporar decisiones con criterios múltiples. No obstante, debe entenderse la metodología como una guía para decidir cuáles técnicas considerar, antes de hacer su revisión técnica en lo particular.

En dicha metodología, se identificaron como variables de decisión al *impacto benéfico* y la *factibilidad* de las alternativas, definiendo criterios particulares tales como aspectos ambientales, económicos, sociales y de disponibilidad de recursos para asignar ponderaciones (consúltese el Anexo E).

Nuevamente, tanto los factores de ponderación como los valores de los coeficientes usados en este análisis fueron supuestos o estimados por el autor en función de la información disponible en la literatura (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989, y González, A.,1996). Sin embargo, es necesario someter estos valores a la revisión de las partes interesadas a fin de obtener cifras y valores más realistas (consúltese el Anexo E). En cualquier caso, los resultados obtenidos son consistentes entre sí, y ayudaron a trazar las estrategias de solución formadas por las combinaciones de alternativas más viables de acuerdo a las diversas variables de decisión consideradas y sus distintos criterios de ponderación.

De esta manera, las 15 alternativas propuestas en esta sección pueden clasificarse ya sea como técnicas de prevención de la eutroficación, o como técnicas de control de dicho fenómeno. Se comienza explicando las técnicas de prevención (técnicas empleadas fuera del lago), para luego describir brevemente a las técnicas de control (técnicas empleadas dentro del lago), de acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), y González, A. (1996).

5.1.1. Técnicas de prevención de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán

Todas las técnicas de prevención de eutroficación tienen como objetivo la remoción de nutrientes (fósforo y/o nitrógeno) del agua de las corrientes tributarias del lago. Entre las técnicas de prevención de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán, se encuentran las siguientes, cuya explicación se incluye a continuación a partir de Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989):

a) *Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.*

Esta técnica consiste en el paso de arroyos con caudales inferiores a los 50L/s (4,320m^3/d) a través de columnas empacadas con partículas de alúmina (óxido de aluminio en forma de aluminato de sodio hidratado: $Na_2O{\cdot}Al_2O_3{\cdot}xH_2O$), con áreas de activación específicas entre los 200 y 300m^2/g con el fin de absorber nitrógeno, fósforo y fosfatos, de acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989). Entre las ventajas de estas columnas están sus bajos costos de operación (no requieren de energía eléctrica, y necesitan poco mantenimiento –generalmente retrolavados para reactivar la columna-), además de que son modulares. Por tanto, esta técnica sí se recomienda para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

b) *Construcción de trincheras de escurrimiento.*

Las trincheras de escurrimiento son canales de aproximadamente 2 a 3m de ancho, los cuales permiten tratar caudales pequeños de menos de 100L/s (8,640m^3/d), según Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989). El agua se extiende a lo largo de la trinchera, y se filtra por el suelo, de modo que el fósforo y nitrógeno quedan adsorbidos al suelo (dado que se trata de un proceso superficial, funciona mejor entre más fina sea la granulometría del suelo sin que éste llegue a ser arcilloso –impermeable-).

La longitud de las trincheras se calcula de acuerdo con:

$$\lambda = \frac{Q}{vb} \tag{5.1}$$

donde λ es la longitud de la trinchera, Q es el caudal del arroyo tributario, v es la velocidad de filtración del agua en el suelo, y b es el ancho propuesto de la trinchera. No es recomendable exponer las trincheras a inundaciones debido a tormentas, para evitar la resuspensión del fósforo adsorbido a la capa superficial del suelo. Asimismo, suelen requerir la construcción de una pequeña cuenca para captar el agua del arroyo

tributario, y los costos de mantenimiento suelen consistir en la limpieza de dicha cuenca, así como la remoción del suelo saturado con fósforo. Por ello, esta técnica sí se recomienda para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

c) *Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.*

Esta alternativa se refiere a la restricción en el uso de detergentes conteniendo fosfatos como agente de limpieza (normalmente mediante la prohibición de su venta en la cuenca). Esto implica la disponibilidad comercial de detergentes con un sustituto de fosfato, siendo el más común el NTA (sal trisódica del ácido nitrilotriacético). Debe tenerse cuidado con el uso de sustitutos de fosfatos en los detergentes, pues puede intercambiarse un problema de calidad del agua por otro: en el caso de NTA, existe la preocupación de que es un agente quelante fuerte, por lo que tiene la habilidad de solubilizar metales pesados e incorporarlos en el agua del lago, además de que el NTA no es sencillo de remover del agua, debido a su persistencia y a la necesidad de métodos biológicos de tratamiento de aguas para su remoción (Manahan, S. E., 1994). Por tales razones, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

d) *Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.*

Esta técnica consiste en la aplicación de sustancias tales como alúmina, cloruro férrico o cal a los arroyos tributarios cerca del punto de entrada al lago a fin de precipitar los ortofosfatos. Las reacciones iónicas de formación de precipitado son las descritas a continuación, formando respectivamente los precipitados de fosfato de aluminio, fosfato férrico e hidroxiapatita (McGhee, T. J., 1999):

$$Al^{+3} + PO_4^{-3} \rightarrow AlPO_4 \downarrow \tag{5.2}$$

$$Fe^{+3} + PO_4^{-3} \rightarrow FePO_4 \downarrow \tag{5.3}$$

$$5CaO + 5H_2O + 3PO_4^{-3} \rightarrow Ca_5(OH)(PO_4)_3 \downarrow + 9OH^- \tag{5.4}$$

Las reacciones anteriores dependen del pH del agua del lago. Para la Reacción (5.2), si la fuente aluminio es alumbre [$Al_2(SO_4)_3 \cdot xH_2O$], entonces la reacción con el agua produce iones de hidrógeno libre con lo que se disminuye el pH, pero si es aluminato de sodio ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot xH_2O$), entonces la reacción es alcalina (se incrementa el pH). Así, debe considerarse que el pH máximo para precipitar el fosfato de aluminio es menor a 6, por lo que el pH de la Reacción (5.2) debe mantenerse por debajo de este valor para formar el precipitado. Asimismo, el pH óptimo para la remoción de fosfato mediante la Reacción (5.3) está entre 4 y 5, mientras que para la reacción (5.4) es cercano a 9 (McGhee, T. J., 1999).

Dado que el promedio geométrico del pH del Lago Zapotlán es de 9.3 (consúltese la Sección 4.2.1. en el capítulo anterior), se recomienda entonces emplear cal para precipitar fosfatos mediante la Reacción (5.4).

Aunque puede emplearse para todo tipo de lagos, la técnica es más adecuada para lagos someros con cargas superficiales elevadas de ortofosfato o fósforo disuelto (10-50g/[m^2-año]), y funciona mejor para lagos con tiempos de retención hidráulica cortos (cercanos a un mes), de acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), lo cual no es el caso para el Lago de Zapotlán, pues por una parte, el tiempo de retención hidráulica es del orden de los 8 a 9 meses (véase Sección 4.1.3. en el capítulo anterior), y por otra, la carga superficial de ortofrosfato es de tan sólo 1.55 g/[m^2-año], de acuerdo con la Ecuación (5.5) y los datos de la Tabla 5.1., mismos que fueron presentados en el Capítulo 4 de esta tesis en las Tablas 4.5., 4.11. y 4.15.

$$L_{PO4} = \frac{Q_e}{A_{\sup}}[PO_4] \tag{5.5}$$

donde Q_e es el flujo volumétrico total de entrada al lago (m^3/*año*), [PO_4] es la concentración de ortofosfato –o de fósforo disuelto- en el lago (g/m^3) y *Asup* es el área superficial del lago (m^2).

Tabla 5.1. Cálculo de la Carga Superficial de Ortofosfato Disuelto.

Q_e (m^3/año)	[PO_4] (g/m^3)	A_{sup} (m^2)	L_{PO4} (g/[año-m^2])
33,334,465	0.57	12,263,232	1.55

Nótese que en la Ecuación (5.5), la relación Q_e/A_{sup} es equivalente a la relación entre la profundidad media y el tiempo de retención hidráulica del lago según sus entradas, es decir:

$$\frac{\hat{H}}{\tau_e} = \frac{Q_e}{A_{\sup}} \tag{5.6}$$

Comparando la relación de la profundidad media del Lago de Zapotlán a su tiempo de residencia, contra su carga superficial de otrofosfato, el criterio de Vollenweider reveló que el lago de Zapotlán se considera ya como hipertrófico (véase la Figura 5.1., la cual fue generada por el programa *Authorware 7* de *Macromedia®*).

Por tanto, dado que esta medida es particularmente útil para lagos con un estado trófico avanzado, a pesar de su baja carga superficial de fósforo y largo tiempo de retención hidráulica, esta técnica de control de la

eutroficación se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán, y se espera que tenga mejor rendimiento durante el temporal de estiaje (para que se eleve al carga orgánica superficial de fósforo –debido a la disminución del área superficial del lago- y se reduzca el tiempo de retención hidráulica –debido a la disminución del volumen almacenado en el lago, y el incremento en las salidas debido a la evaporación y mayores extracciones-).

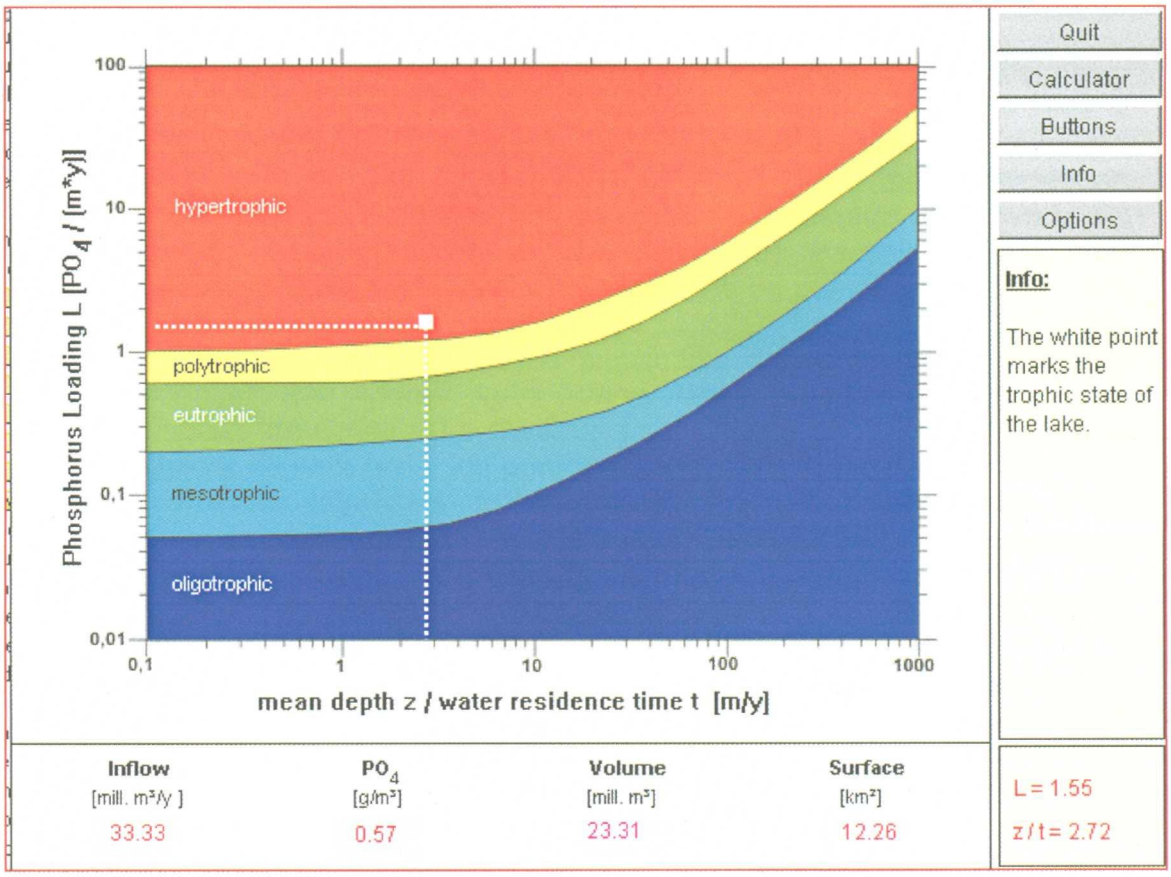

Figura 5.1. Estado Trófico del Lago de Zapotlán según el Criterio de Vollenweider.

e) *Canalización y derivación de aguas negras y residuales.*

Esta técnica consiste en evitar que las aguas residuales ricas en nutrientes sean descargadas en el lago. Para ello, se construyen estructuras de derivación (canales) o se entuban las descargas, y son conducidas hasta otro punto para su descarga. No obstante, aún cuando el cuerpo de agua de interés pueda ser protegido por esta técnica, posiblemente sólo se esté transportando el problema de un lugar a otro, a menos que en el otro punto de descarga se tenga la capacidad de lograr la depuración del agua residual sin un detrimento considerable en la calidad del agua. Por estas razones, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

f) *Control en los usos del suelo de la cuenca.*

Esta técnica consiste en restringir las actividades agropecuarias en el área de impacto de la cuenca obre el lago (425km^2 para la Cuenca del Lago de Zapotlán, de acuerdo con la Sección 3.2.1.). Para el caso de la Cuenca del Lago de Zapotlán, esta técnica implicaría la preparación de un marco institucional y legislativo basto, el desaprovechamiento de tierras fértiles, y el descontento social. Por tanto, esta técnica no se recomienda para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán, a menos que se enfoque en reubicar a las granjas porcinas y ranchos lecheros alrededor del lago.

g) *Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.*

Esta técnica consiste en la construcción de plantas de tratamiento las cuales concentren los cauces de las corrientes tributarias para llevar a cabo operaciones de floculación, precipitación y filtración para remoción de fósforo, principalmente. La técnica se considera muy eficiente en cuanto a remoción de nutrientes, y a un costo moderado en términos del tratamiento. No obstante, la costo-efectividad de la técnica depende del éxito para concentrar las corrientes tributarias en puntos específicos para su tratamiento. En el caso del Lago de Zapotlán, las corrientes tributarias convergen en sólo seis arroyos principales dentro de sus respectivas subcuencas: *San Andrés*, *Agua Buena*, *Arroyo Delgado*, *Carboneras*, *La Tijera-Salto de Cristo* y *La Catarina* (consúltense en la Tabla 2.4. en el Capítulo 2 de esta tesis, los puntos de entrada al Lago de Zapotlán para las corrientes tributarias de la cuenca). Por ello, esta técnica sí se recomienda para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

h) *Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.*

Esta técnica consiste en la construcción de pequeñas presas las cuales funcionan como reactores de producción de algas: el diseño d las presas es tal que permite un tiempo de residencia suficiente para que se desarrollen algas y se sedimenten en la presa, atrapando al fósforo y nitrógeno en los sedimentos, de modo que el agua clarificada puede llegar libre de gran parte de nutrientes al lago. Incluso, pueden conectarse presas en serie antes su descarga en el lago a fin de maximizar la remoción de nutrientes. Asimismo, se sugiere combinar esta técnica con el uso de sistemas de humedales (también llamados como *wetlands*) utilizando macrófitas fijas, tales como el tule. Por tanto, esta técnica sí se recomienda para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

i) *Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.*

Esta técnica consiste en aprovechar las instalaciones existentes de tratamiento de aguas residuales para utilizar productos tales como

alúmina, cloruro férrico o carbonato de calcio para formar precipitados de fósforo removibles en las propias plantas de tratamiento antes de su entrada al lago. Además, existen trenes de tratamientos de tipo biológico los cuales combinan etapas anaerobias/anóxicas con etapas aeróbicas para eficientar la remoción de nutrientes mediante el empleo de microorganismos (Crites, R. W. & Tchobanoglous, G., 1998). La efectividad de esta técnica depende, desde luego, de la existencia de instalaciones de tratamiento y del funcionamiento de las mismas. Además, supone la factibilidad de tratar en dichas plantas además de las aguas residuales, a las aguas de corrientes tributarias. Esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán dependiendo del tren de tratamiento y calidad de la operación de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales dentro de la cuenca.

5.1.2. Técnicas de control de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán

Las técnicas de control de la eutroficación tienen como objetivo la remoción de nutrientes (fósforo y/o nitrógeno) del agua contenida en el lago. Entre las técnicas de control de la eutroficación disponibles para el Lago de Zapotlán, se encuentran las mencionadas a continuación, cuya explicación se incluye a continuación a partir de Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), y González, A. (1996):

a) *Cosecha de plantas y algas en el lago.*

Esta técnica consiste en la remoción de maleza acuática y plantas por medios mecánicos. Sus efectos son inmediatos con beneficio para la salud humana,[16] los valores estéticos del lago y la práctica de deportes acuáticos, pero no constituyen una solución real del problema. Los costos asociados pueden elevarse debido a que se requiere repetir la técnica frecuentemente (el tule, por ejemplo, alcanza un desarrollo de tres a cuatro metros del altura durante un período entre tres y cuatro meses, según González, A. (1996), así como la necesidad de disponer de los residuos de plantas: los residuos suelen quemarse sobre los bordos, pues se ha intentado aprovechar el lirio como alimento para animales, pero es una planta baja en proteínas y su contenido de humedad provoca diarrea en el ganado, por lo que no se recomienda su uso como forraje (González, A., 1996). Por otra parte, existen los riesgos a la salud de los

[16] Las macrófitas acuáticas (principalmente lirio y tule) ofrecen en sus hojas un medio adecuado para el desarrollo de mosquitos, además de que en sus raíces se hospedan caracoles, siendo tanto los unos como los otros vectores de enfermedades (González, A., 1996).

trabajadores encargados de la cosecha, debido a la permanencia prolongada de éstos en agua contaminada (González, A., 1996). Por lo tanto, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

b) *Incremento en los flujos de salida del lago.*

Esta técnica consiste en aumentar las extracciones de un lago con el fin de remover nutrientes. No obstante, a fin de evitar afectaciones por la disminución drástica de nivel, la técnica va acompañada a su vez del incremento en los flujos de entrada. No obstante, es requisito que el agua que se introduzca al lago esté libre de nutrientes. De acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), el incremento en los flujos de salida del lago reduce la oportunidad de acumulación de biomasa (algas), mientras que el incremento en los flujos de entrada diluye la concentración de nutrientes en el lago. No obstante, la efectividad de la técnica depende de la disponibilidad de grandes cantidades de agua baja en nutrientes (por ejemplo, agua de lluvia colectada directamente, pero no la que se encuentre en forma de escorrentía). Por tal razón, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán durante el temporal de lluvias.

c) *Dragado de sedimentos.*

De acuerdo con Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989), esta técnica es recomendable para lagos enriquecidos con cantidades considerables de nutrientes durante largos períodos de tiempo, es decir, con un estado trófico avanzado. La técnica consiste en la remoción mecánica de sedimentos a fin de reducir las fuentes internas de nutrientes y otras sustancias tóxicas. Sus desventajas son los costos de operación en función del área y profundidad del lago, y la necesidad de disposición de sedimentos, así como la posibilidad de reintegrar al agua algunos nutrientes atrapados en los sedimentos. Por lo tanto, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

d) *Trituración de lirio y/o tule.*

La técnica consiste en el empleo de maquinaria especializada para cosechar maleza acuática (lirio y/o tule, aunque también puede tratarse de carrizo). No obstante, la técnica sólo es efectiva si se retira el lirio triturado del cuerpo de agua; de lo contrario, el lirio triturado se va al fondo del lago donde incrementa la demanda bioquímica de oxígeno y al triturarse presenta una mayor área de activación para la reincorporación de nutrientes al agua, por lo que definitivamente la técnica no constituye una solución si la maleza triturada entra en contacto con el agua. Por ello, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

e) *Control químico de algas y maleza.*

Esta técnica consiste en aplicar alguicidas (tales como el sulfato cúprico) y herbicidas para evitar los crecimientos de macrofitas (por ejemplo, tule). Las desventajas de la técnica radican en el costo elevado de los productos químicos y la necesidad de aplicaciones frecuentes, además de los posibles efectos tóxicos sobre peces y cultivos regados con el agua del lago. En el caso especifico de Jalisco, se han realizado pruebas con herbicidas orgánicos tales como el 2,4-D, aplicándolo en forma pulverizada sobre la maleza acuática a razón de 3kg de equivalentes ácidos de sales aminas por hectárea del área superficial del lago; aunque el herbicida destruyó las partes emergentes de las plantas, no fue así con sus partes sumergidas, lo que dio pie a nuevos brotes de maleza después de un tiempo (González, A.,1996). Por eso, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

f) *Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.*

La técnica consiste en revestir el fondo del lago con cubiertas plásticas o con materiales particulados para evitar el intercambio de nutrientes entre el agua y los sedimentos existentes al momento de aplicar el material, así como para limitar el desarrollo de macrofitas. La desventaja principal es su costo. Por lo tanto, esta técnica se recomienda con reservas para el caso específico de la Cuenca del Lago de Zapotlán.

5.1.3. Recomendaciones específicas de técnicas de prevención y control de la eutroficación para el Lago de Zapotlán

Después de haber hecho la revisión técnica de las alternativas presentadas en las Secciones 5.1.1. y 5.1.2., en la Tabla 5.2. se presenta a continuación un resumen del estado de recomendación de las 15 técnicas inicialmente sugeridas.

Nótese que en la Tabla 5.2. se ha incluido una columna de observaciones, destacando la condicionante más relevante para cada técnica analizada.

En general, la metodología empleada para definir las técnicas a considerar (consúltese el Anexo E al final de esta tesis) resultó útil, pues ninguna de las técnicas sugeridas por la metodología fue definitivamente rechazada después de su revisión técnica en las Secciones 5.1.1. y 5.1.2. anteriores. Nótese además, que la Tabla 5.2. sugiere que en función de los resultados potenciales esperados (así como por el beneficio ambiental esperado), es más conveniente el empleo de técnicas de prevención que de control de la eutroficación.

Tabla 5.2. Recomendación de Técnicas de Prevención y Control de la Eutroficación para el Lago de Zapotlán.

Alternativa	Recomendación para el Lago de Zapotlán	Obervaciones
Técnicas de prevención de la eutroficación		
Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	Sí	En puntos de convergencia de arroyos antes de su entrada al lago.
Construcción de trincheras de escurrimiento.	Sí	En planicies no inundables.
Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	Con reservas	Sólo si hay sustitutos de fosfato comercialmente disponibles, y éstos prueban no tener afectaciones negativas al medio ambiente.
Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	Con reservas	Sólo durante temporada de estiaje.
Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	Con reservas	Sólo si el agua es conducida a instalaciones de tratamiento antes de ser vertidas.
Control en los usos del suelo de la cuenca.	Con reservas	Particularmente para reubicar granjas porcinas y ranchos lecheros, o bien emplear control de residuos para evitar la descarga de desechos orgánicos al lago.
Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	Sí	En puntos de convergencia de arroyos antes de su entrada al lago.
Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	Sí	En puntos de convergencia de arroyos antes de su entrada al lago. Se sugiere emplear además sistemas de humedales empleando tule.
Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	Con reservas	Previo el arranque y estabilización de las instalaciones existentes de tratamiento de aguas residuales.
Técnicas de control de la eutroficación		
Cosecha de plantas y algas en el lago.	Con reservas	Solución para el corto plazo.
Incremento en los flujos de salida del lago.	Con reservas	Sólo durante temporada de lluvias, evitando en lo posible la mezcla de agua pluvial con escorrentías, y siempre y cuando el balance volumétrico del lago sea positivo.
Dragado de sedimentos.	Con reservas	Sólo en caso de que otras medidas no resulten suficientes, y siempre y cuando se utilicen dragas especiales para evitar la resuspensión de sedimentos.
Trituración de lirio y/o tule.	Con reservas	Siempre y cuando se retire la maleza triturada del agua.
Control químico de algas.	Con reservas	Solución para el corto plazo.
Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	Con reservas	Sólo en caso de que otras medidas no resulten suficientes.

5.2. Propuesta de investigaciones futuras en torno al Lago de Zapotlán

A fin de concretar los esfuerzos de diagnóstico y acción hacia el manejo sustentable del Lago de Zapotlán y de su cuenca, se recomienda expandir en trabajos futuros en el corto a mediano plazo los alcances de esta investigación mediante cinco líneas de acción principales desde diversos frentes:

1. Ampliar base temporal para el balance volumétrico del Lago de Zapotlán, es decir, extender los datos hidrométricos de origen más allá del período 1982-2002, y de ser posible, cambiar la resolución temporal de los datos de meses, a semanas o incluso días, a fin de tener valores promedio de flujo o volúmenes más representativos sobre lapsos de tiempo más cortos, y con ello afinar el balance en función de sus entradas y salidas. Asimismo, es conveniente incluir en el balance estimaciones de flujos subterráneos (infiltraciones / exfiltraciones y manantiales sumergidos), así como los efectos de evapotranspiración debidos a la presencia de maleza acuática. Esta afinación del balance permitiría una mejor gestión del cuerpo de agua al considerar integralmente el manejo hidrológico de la cuenca en términos del agua superficial y subterránea considerando su efecto sobre el lago. Nuevamente, lo anterior implica la generación y recolección de datos reales para probarlos en modelos teóricos a fin de incorporar sus estimaciones en el balance volumétrico del Lago de Zapotlán.

2. Incrementar la periodicidad de los monitoreos de calidad del agua deseablemente a un monitoreo por mes, a fin de poder comprender mejor la dinámica del transporte y destino de contaminantes hacia el Lago de Zapotlán. Para esto, no es necesario cada mes repetir la batería de análisis descrita en el Anexo D, sino reducir la cantidad de parámetros eliminando el cloro residual y metales pesados bajo la base de que éstos permanecieron bajo el límite de detección de las pruebas para los casos particulares del Anexo D. Además, es posible hacer los monitoreos para una base reducida de parámetros considerando la posibilidad e hacer estimaciones estadísticas a partir de unos cuantos parámetros a partir de las correlaciones encontradas en la Sección 4.2.3. Por otra parte, aunque se recomienda repetir las coordenadas de los puntos de monitoreo según fue indicada su ubicación en la Sección 3.2.2., de efectuarse un estudio de corrientes dentro del lago, podrían definirse otros puntos de monitoreo los cuales representen mejor la distribución de tiempos de residencia en el lago, y con ello, considerar las distribuciones espaciales de calidad del agua sobre diversas zonas bajo diferentes regímenes de mezclado.

3. Monitorear al menos una vez al mes la distribución de la contaminación en la columna de agua del lago, tomando muestras del líquido a distintas profundidades en diversos puntos de monitoreo. Asimismo, se recomienda centrar el énfasis de los monitoreos en el análisis de DBO, nutrientes y parámetros bacteriológicos tanto para el agua del lago a distintas profundidades como en los sedimentos del lago, a fin de determinar si pueden establecerse patrones de comportamiento para las épocas de lluvias y de estiaje, y entender el efecto de la resuspensión para los regímenes hidráulicos desarrollados durante los meses del año.

4. Apoyar la obtención de datos específicos al Lago de Zapotlán para el modelo de eutroficación descrito en la Sección 3.2.4., para así calibrarlo en torno a dicho vaso lacustre. Particularmente, se recomienda contar con datos específicos de la temperatura promedio del agua para los diferentes meses del año. Desde luego, la calibración del modelo supone la obtención de datos específicos de muestreos de plancton, así como la determinación en laboratorio y estimaciones matemáticas de parámetros fisicoquímicos y cinéticos a partir de una base muy amplia de datos experimentales, por lo que su calibración final se espera en el largo plazo, pero para ello es recomendable comenzar con la generación de datos experimentales en el corto plazo o mediano plazo. De esta forma, el desarrollo y calibración de un modelo numérico de simulación de calidad del agua (enfatizando el proceso de eutroficación) para el caso particular del Lago de Zapotlán, permitirá examinar la respuesta del lago bajo diferentes condiciones y prácticas de manejo y predecir el futuro desarrollo ambiental y productivo del lago.

5. Poner en práctica la metodología presentada en el Anexo E, a fin de hacer una revisión técnica las alternativas existentes para la prevención y control de la eutroficación a partir del análisis de datos generados condensadamente para el caso específico del Lago de Zapotlán. Cabe la aclaración de que la aplicación de dicha metodología supone la participación activa durante varias sesiones de las partes interesadas, tales como representantes de la sociedad civil, funcionarios de gobiernos, agricultores, ganaderos, pescadores, industriales, organizaciones no gubernamentales, técnicos en la materia e investigadores. Los resultados alcanzados permitirán el desarrollo de un plan estratégico de prevención y control de la eutroficación del Lago de Zapotlán, y facilitarán su implementación práctica a partir de la participación incluyente de las partes involucradas en su ejecución.

Además de dichas continuaciones potenciales de esta investigación, los otros trabajos con los cuales se relaciona directamente esta tesis están enfocados ya sea hacia la evaluación de la integridad biológica del Lago de Zapotlán, caracterización del fitoplancton en el lago o la constitución de planes de aprovechamiento forestal de la cuenca. De esta forma, la investigación de

esta tesis se desarrolló inicialmente en forma paralela a los otros trabajos mencionados de investigación en relación con el Lago de Zapotlán, y el progreso en sus resultados sirvieron para sustentar las etapas posteriores de tales otros trabajos referidos, mismos que serán terminados en el corto o mediano plazo.

En su conjunto, se recomienda la integración de esta tesis junto con los trabajos de investigación ya mencionados para emitir el diagnóstico técnico ambiental de la Cuenca del Lago de Zapotlán en una etapa posterior. Este diagnóstico ambiental permitiría conocer la dinámica de su problemática, así como la visión sistémica de la cuenca en relación con las actividades humanas. Lo anterior permitiría, por tanto, una planeación estratégica en cuanto al manejo de la cuenca y de sus recursos hídricos y biológicos, encaminada hacia la restauración y correcta gestión ambiental del lago (y por ende, de la cuenca).

Por otra parte, se recomienda además llevar a cabo otras investigaciones de corte ambiental en torno al Lago de Zapotlán. Con el fin de comprender y predecir posibles afectaciones a la salud humana y animal por el uso del agua del Lago de Zapotlán, una de dichas investigaciones consiste en llevar a cabo un análisis de riesgos por exposición en torno a sustancias tóxicas de acuerdo a un modelo conceptual el cual identifique la fuente de los contaminantes principales del agua del lago, así como sus receptores potenciales.

Asimismo, se sugiere realizar análisis de riesgos ambientales con énfasis en la pérdida de pesca e incremento de la vulnerabilidad de especies de fauna lacustre por el desarrollo de las tendencias de anoxia dentro del Lago de Zapotlán y el asolvamiento del vaso lacustre por el ingreso de sedimentos y materia orgánica en las entradas al lago.

Además, se recomienda llevar a cabo investigaciones en torno a la ingeniería de tratamiento de aguas residuales mediante métodos convencionales y no convencionales (como humedales de macrófitas) para las distintas localidades dentro de la Cuenca del Lago de Zapotlán, favoreciendo configuraciones de bajos costos de operación y mantenimiento en comparación con las plantas fisicoquímicas o biológicas convencionales de tratamiento de aguas municipales.

Asimismo, se emite la recomendación de llevar a cabo investigaciones desde el ámbito de la economía ambiental y de los recursos naturales, las cuales apoyen el manejo sustentable de los recursos explotables de la cuenca y del lago mismo, poniendo especial énfasis en la producción sustentable de las actividades de pesca, agricultura y ganadería además de la producción de leche y el aprovechamiento de recursos maderables, así como en la valoración económica de los aspectos intangibles (tales como la belleza escénica) de la cuenca a fin de favorecer su desarrollo ecoturístico en una forma verdaderamente sustentable. De igual forma, otro de los enfoques recomendados para este tipo de investigaciones es la determinación de los

niveles y densidades sustentables de la población en la cuenca dadas las tasas de consumo y regeneración de los recursos naturales de la cuenca.

Además, se recomienda emplear herramientas de modelación de calidad del agua más poderosas para poder simular no sólo la distribución espacial de contaminantes sobre la superficie del lago, sino también sobre su profundidad, y simular su distribución en el volumen del lago en función del tiempo. Se propone incluso considerar simulaciones en el largo plazo (con horizontes de tiempo de más de 20 años) considerando escenarios de detrimento de la calidad del agua del vaso lacustre bajo distintas configuraciones de implementación de medidas de rehabilitación del lago (incluyendo una configuración en la cual no existan medidas de rehabilitación). Esto permitirá, además de un mayor entendimiento de la efectividad de las medidas de rehabilitación, establecer metas y fechas para los esfuerzos de remediación, control y prevención de la contaminación del lago (con un especial énfasis sobre los nutrientes de la cuenca).

De esta forma, se recomienda la elaboración de un Plan de Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Zapotlán conjuntamente a partir de la conciliación de las propuestas hechas por CEAS en el *Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán* (2003) y por la Universidad de Guadalajara en el *Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna* (2002), admitiendo la ampliación de sus horizontes técnicos en concordancia con los resultados de la investigación reportada en esta tesis. Asimismo, se recomienda que la estructura de dicho Plan de Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Zapotlán sea lo suficientemente flexible como para incorporar resultados de investigaciones posteriores de relevancia a la cuenca y al lago (tales como la sugeridas en este capítulo), y que mantenga como premisa la inclusión participativa de actores sociales tales como los habitantes de la cuenca, instancias de gobierno, asociaciones de productores e industriales y, desde luego, universidades y centros de investigación.

Asimismo, se recomienda que dicho Plan de Manejo Sustentable para la Cuenca del Lago de Zapotlán esté soportado por un DSS[17] de acuerdo con Maniak, U. (2004). Un DSS consiste en la aplicación de una metodología para la conservación sustentable de lagos. Como tal, es una herramienta tanto para auxiliar en el proceso de toma de decisiones a las partes involucradas en la problemática del cuerpo de agua, como para el desarrollo de capacidades técnicas y la determinación de las necesidades de la investigación científica en torno al lago. De esta forma, el objetivo del DSS es el manejo de toda la cuenca respectiva para reducir la eutroficación del Lago de Zapotlán.

El DSS permitiría valorar los proyectos disponibles de acuerdo a indicadores económicos y ambientales a través de la aplicación de herramientas

[17] Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones: DSS por sus siglas en inglés (*Decision Support System*).

de evaluación multi-criterio (como la propuesta en el Anexo E de esta tesis) y optimizaciones matemáticas. Además, el DSS incorporaría la estructura necesaria para llevar a cabo investigación científica relevante para el Lago de Zapotlán, favoreciendo así la formación, capacitación, desarrollo y participación de expertos en las disciplinas de: ingeniería hidráulica y de recursos hídricos, ingeniería ambiental, hidrología, hidrobiología, hidrogeología, bioquímica, limnología, economía y ciencias sociales.

Así, a través de la opinión de expertos y de los usuarios del lago mediante el uso de un DSS, las partes involucradas podrían juzgar las propuestas de proyectos para reducir la eutroficación del lago de Zapotlán en función de su eficiencia económica, sustentabilidad y aceptación pública.

Por lo tanto, la recomendación final en torno al lago de Zapotlán es el diseño e implementación de un DSS a fin de desarrollar la investigación relevante necesaria para la reducción de la eutroficación del lago e incorporar a todas las partes involucradas en el diseño de estrategias de rehabilitación del vaso lacustre mediante la toma de decisiones multi-criterio en torno al manejo de la cuenca. Con esto, se fortalecerán las estructuras necesarias para la integración e implementación de un Plan de Manejo Sustentable para la Cuenca del Lago de Zapotlán.

6. CONCLUSIONES

En este capítulo se incluyen las conclusiones relevantes a partir del desarrollo de esta investigación (se sugiere al lector que consulte los objetivos de la investigación en la Sección 1.3., así como las hipótesis de la investigación en la Sección 3.1. de esta tesis).

Por una parte, fue posible desarrollar un modelo hidrológico para el Lago de Zapotlán a partir de un modelo morfométrico al cual se ajustaron sus dimensiones, un balance volumétrico el cual aproximó el funcionamiento del vaso lacustre, y la determinación de tiempos de retención hidráulica para expresar la base temporal de permanencia del agua dentro del lago.

En primera instancia, el modelo morfométrico propuesto a partir del ajuste de los datos de topobatimetría, describe satisfactoriamente al Lago de Zapotlán, por lo que su empleo permite en todo momento conocer el volumen, área superficial, profundidad media y profundidad máxima del vaso lacustre a partir de la determinación en campo únicamente de la cota superficial del nivel del lago.

Asimismo, el balance volumétrico del Lago de Zapotlán a partir de los datos promedio mensuales durante el período 1982-2002, reveló que el comportamiento hidrológico del lago puede distinguirse de acuerdo a dos temporadas: la de estiaje, desde fines de noviembre hasta mayo, en la cual el nivel del lago disminuye consistentemente; y la de lluvias, desde junio hasta octubre, en la cual el lago recupera su nivel e incluso exhibe un balance positivo anual considerando el total de entradas y salidas durante el año, aunque en realidad es poco el superávit de líquido (cercano al 7% con respecto a los volúmenes totales de entrada o salida durante el año). De esta manera, es imprescindible asegurar que las salidas de agua del lago se mantengan en niveles inferiores a los de sus entradas para conservar la disponibilidad del líquido en el lago. Para esto, se recomienda que la administración del uso del agua se haga en función de las temporadas de estiaje y de lluvias considerando el volumen contenido en el lago al inicio, durante y al final de tales estaciones.

En cuanto al tiempo de retención hidráulica, el Lago de Zapotlán exhibe tiempos de retención prolongados, con un promedio aproximado entre 8 y 9 meses. Esto provoca que los nutrientes y contaminantes permanezcan en el lago durante largo tiempo, incrementándose sus afectaciones al proceso de eutroficación, el desarrollo de algas verde-azules y el consecuente detrimento de la calidad del agua del lago.

Por otra parte, los valores muestreados de los parámetros de calidad del agua dentro del Lago de Zapotlán sugieren la existencia de correlaciones de proporcionalidad directa entre algunos de tales parámetros para dicho vaso lacustre (concretamente para el caso de *fósforo total* y *fósforo disuelto total, salinidad* y *sólidos disueltos totales*, *coliformes totales* y *coliformes fecales*, *coliformes totales* y *Escherichia coli*, y *coliformes fecales* y *Escherichia coli*). No obstante, es necesario conseguir más datos para corroborar tales correlaciones, y de ser así, afinar los coeficientes de las regresiones lineales correspondientes, a fin de poder estimar parámetros sin necesidad de monitorearlos a todos, a menos claro, que los monitoreos se hagan con el fin de calibrar modelos y simulaciones de calidad del agua.

En cuanto al uso de *RAISON™*, si bien la herramienta es útil para simular la modelación de calidad del agua, es necesario tener más puntos de monitoreo sobre el Lago para generar perfiles más completos de calida del agua. Por otra parte, la mayoría de los contaminantes estudiados tienden a una concentración más o menos uniforme en el centro del lago, lo cual indica que el lago está bien mezclado y que los muestreos superficiales son suficientes para estimar la calidad del agua del vaso lacustre, pero aún así conviene conocer la distribución de contaminantes y nutrientes en la columna de agua. Asimismo, las zonas más contaminadas, e incluso con tendencias de anoxia, son aquellas cercanas a los puntos de descarga de aguas residuales, tendiendo a mejorarse la calidad del agua hacia el centro del lago (donde hay una más vasta superficie libre y mayor profundidad).

De esta forma, la calidad del agua del Lago de Zapotlán es impactada por las descargas de aguas negras de los municipios de Gómez Farías y Zapotlán el Grande, mismas que durante el año 2003 no cumplieron con la *NOM-001-SEMARNAT-1996* con respecto a los límites de descarga permisibles para embalses naturales de uso predominantemente agrícola, concretamente en cuanto a los parámetros de *organismos coliformes fecales*, *demanda bioquímica de oxígeno* y *fósforo total*. Este carácter antropogénico de la contaminación del Lago de Zapotlán revela que la rehabilitación del cuerpo lacustre debe tratarse integralmente no sólo con acciones de control o remediación de los niveles de contaminación ya existentes en el agua, sino que debe darse un especial énfasis a la prevención de la contaminación adoptando de medidas que reduzcan el impacto negativo de la presencia y actividades humanas sobre el lago.

Por lo tanto, si el Lago de Zapotlán sigue recibiendo aguas residuales por encima de los límites fijados por la *NOM-001-SEMARNAT-1996*, la salud de los usuarios del agua del lago se verá afectada por la incidencia de enfermedades gastrointestinales e infecciones dérmicas. Asimismo, el aporte excesivo de materia orgánica en las aguas residuales incrementará las tendencias de anoxia en el lago, debido al aumento de materia orgánica disuelta en el agua y de sedimentos orgánicos demandantes de oxígeno (es decir, incrementándose el asolvamiento del lago). Esta disminución en los niveles de oxígeno disuelto

resultará en la disminución de la producción pesquera (restringiendo ésta a aquellas zonas en el lago con mayores concentraciones de oxígeno), así como en el incremento de la vulnerabilidad de especies endémicas, migratorias (como aves) o introducidas por su valor comercial. Es de esperarse que la pesca de especies como el pescado blanco vaya siendo gradualmente reemplazada por la de especies tales como la carpa o la tilapia, siendo éstas menos vulnerables ante el detrimento de la calidad del agua en cuerpos de agua dulce.

Es importante hacer notar que a pesar de tratarse de un lago en latitudes tropicales, el criterio para lagos templados señala que en el caso de la cuenca de interés, el nutriente limitante es el fósforo para las descargas de aguas residuales (de Ciudad Guzmán y del municipio de Gómez Farías), y que para el caso del Lago de Zapotlán el nutriente limitante es el nitrógeno, por lo que existe una excedencia notable fósforo en las aguas del Lago de Zapotlán. Esta excedencia de fósforo es evidenciada por el avanzado estado trófico del vaso lacustre, clasificado como un lago hipertrófico según el criterio de Vollenweider en base al fósforo orgánico total presente en el cuerpo de agua, así como sus dimensiones y flujos de entrada.

Así, más que enfocarse sobre el nutriente limitante para atacar el problema de eutroficación, las técnicas de combate a este fenómeno deben enfocarse en el caso del Lago de Zapotlán a ambos nutrientes, poniendo el énfasis de control en el fósforo y la prevención de la llegada de nitrógeno. El enfoque de atención a los nutrientes en el lago y la prevención del ingreso de más nutrientes al mismo es indispensable en cualquier plan de manejo que busque asegurar que el Lago de Zapotlán podrá mantenerse en condiciones de existencia sustentable.

Se espera que la población de la Cuenca de Zapotlán crezca en aproximadamente el 15% para el año 2020 con respecto a la población registrada en el año 2000, destacándose los casos de Ciudad Guzmán y San Sebastián del Sur. Este incremento en la población tendrá afectaciones directas sobre el nivel del Lago de Zapotlán al incrementarse la demanda de agua en la cuenca. Asimismo, dado que la contaminación que recibe el lago es de tipo antropogénico, de no tomarse medidas de tratamiento y control de aguas residuales, un incremento en la población traería un detrimento mayor en la calidad del agua del vaso lacustre si éste recibiera mayores cantidades de materia orgánica y nutrientes en las descargas de aguas residuales provenientes de las zonas urbanas, establos, ranchos y granjas porcinas (zahúrdas) de la cuenca. El crecimiento de la población de la cuenca debe ser considerado, por tanto, en cualquier iniciativa de manejo sustentable del Lago de Zapotlán.

Por otra parte, en cuanto al uso de modelos de eutroficación, aun cuando la herramienta matemática de solución numérica, junto con las herramientas de programación en computadora, permiten resolver problemas complejos en ingeniería, específicamente en ingeniería ambiental, es necesario además no perder de vista que los modelos en general tienen limitaciones y que sus

resultados son aproximaciones a la realidad. En el caso de fenómenos complejos, la mayor utilidad de los modelos reside en la habilidad para comprender la relación de los factores involucrados en los fenómenos estudiados. Una vez que un modelo prueba representar aceptablemente dichas relaciones, un paso crítico consiste en la calibración del mismo antes de poder ser usado como herramienta de predicción o auxiliar en la toma de decisiones. Cabe resaltar que el efecto final de la eutroficación es el agotamiento de los recursos bióticos de un lago: la eutroficación disminuye los niveles de actividad biológica afectando e incluso destruyendo potencialmente las cadenas alimenticias establecidas dentro del cuerpo de agua.

En cuanto a la recomendación de las alternativas que deben conformar una estrategia de prevención y control para el Lago de Zapotlán, la metodología propuesta de evaluación basada en el cálculo de los índices de *impacto benéfico*, *factibilidad* y consecuentemente de *viabilidad*, ha probado ser útil para el proceso de toma de decisiones en cuanto a alternativas de solución de problemas ambientales bajo escenarios con criterios múltiples. Si bien es necesario hacer una revisión de los valores empleados para la generación de las prioridades basadas en la viabilidad de las alternativas técnicas (es decir, la generación de valores numéricos a partir de la inclusión participativa de las partes involucradas en la problemática del Lago de Zapotlán), las alternativas recomendadas en esta tesis para su consideración en un plan estratégico de prevención y control de la eutroficación constituyen una guía general para el mejoramiento de la calidad del agua del Lago de Zapotlán. Es necesario, desde luego, considerar análisis de costo / beneficio o análisis de costo-efectividad para justificar las inversiones en proyectos de prevención y control de la eutroficación del Lago de Zapotlán.

Asimismo, es conveniente centrar la atención en técnicas de prevención de la eutroficación para evitar que lleguen los nutrientes al Lago de Zapotlán, pero también es necesario controlar los niveles de nutrientes ya presentes en las aguas del vaso lacustre. En general, todas las técnicas de prevención y control de la eutroficación exhiben diversas ventajas y desventajas, y su elección debe obedecer a una planeación estratégica para establecer las combinaciones más favorables para mejorar, recuperar y mantener la calidad del agua del lago.

Finalmente, en particular para el Lago de Zapotlán, las acciones prioritarias en un programa de rehabilitación deben atender los aspectos de: (a) tratamiento y desinfección de aguas residuales, (b) manejo de la cuenca con un enfoque principal hacia los nutrientes en el lago (control y prevención), (c) planeación, control y gestión de las extracciones del lago para asegurar que las salidas totales estén por debajo de las entradas identificadas de agua al vaso lacustre y (d) proyecciones de crecimiento en infraestructura para soportar el crecimiento de la población de la cuenca sin rebasar las capacidades de rehabilitación del lago.

ANEXO A. PRECIPITACIÓN SOBRE LA CUENCA DEL LAGO DE ZAPOTLÁN

Tabla A.1. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de Atoyac durante el Período 1982-2002.

Precipitación Mensual Registrada en Atoyac *(mm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	0.0	14.2	10.8	3.5	0.0	3.5	0.0	0.0
Febrero	0.0	0.0	0.0	2.5	3.5	22.9	0.0	0.0
Marzo	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	10.7	0.0
Abril	0.8	0.0	0.0	0.0	2.7	2.5	0.0	2.0
Mayo	1.2	50.9	9.3	0.0	16.2	15.5	0.0	0.0
Junio	44.4	38.8	151.4	288.0	228.4	175.0	148.4	78.1
Julio	177.8	236.9	137.1	193.7	224.2	217.7	153.7	156.1
Agosto	108.1	109.7	140.1	117.6	100.2	115.2	148.6	42.9
Septiembre	66.9	68.9	66.1	50.7	64.7	58.6	130.7	98.9
Octubre	90.2	28.6	20.7	0.0	65.4	0.0	0.0	28.4
Noviembre	98.2	4.4	4.7	17.8	6.0	1.0	0.0	8.4
Diciembre	50.3	0.0	18.6	0.0	8.7	0.0	1.5	9.2
Total	637.9	552.4	558.8	676.5	720.0	611.9	593.6	424.0
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	9.8	1.5	331.5	32.0	0.0	3.7	0.0	6.5
Febrero	2.8	0.0	4.5	0.0	0.0	9.5	0.0	1.5
Marzo	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.2
Abril	2.1	3.0	18.5	0.5	0.0	0.0	0.0	22.7
Mayo	8.5	15.0	17.0	2.5	15.5	5.0	44.8	15.0
Junio	62.3	109.2	27.4	100.9	85.2	172.9	137.7	72.0
Julio	72.7	74.7	97.4	251.3	84.1	143.5	99.7	144.4
Agosto	63.2	186.5	127.0	145.8	137.9	233.0	132.4	72.7
Septiembre	42.3	54.7	74.8	84.2	66.6	104.8	39.2	29.2
Octubre	30.5	13.8	113.2	42.8	38.7	19.8	47.5	91.5
Noviembre	0.0	25.8	3.5	0.0	11.1	14.2	10.7	36.0
Diciembre	2.0	39.0	21.0	14.7	3.0	7.5	0.0	1.0
Total	298.7	523.2	835.8	674.7	442.1	713.9	512.0	525.7
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*20.0*	71.8	3.6
Febrero	0.0	4.1	0.0	0.5	20.5	*3.4*	6.5	1.9
Marzo	0.0	4.4	0.0	10.0	0.0	*3.0*	7.6	2.5
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*2.6*	6.1	2.3
Mayo	0.0	7.5	87.5	55.7	47.0	*19.7*	23.6	1.2
Junio	69.6	55.0	116.0	68.0	178.5	*114.6*	67.1	0.6
Julio	118.0	85.0	10.1	140.5	196.5	*143.6*	62.6	0.4
Agosto	65.5	117.5	135.0	177.5	70.0	*121.3*	45.1	0.4
Septiembre	182.0	138.0	90.0	72.5	128.5	*81.5*	37.6	0.5
Octubre	71.5	39.0	24.3	38.0	101.5	*43.1*	33.7	0.8
Noviembre	0.0	9.9	1.5	0.0	2.5	*12.2*	21.8	1.8
Diciembre	0.0	9.3	0.0	0.0	0.3	*8.9*	13.6	1.5
Total	508.6	469.7	464.4	562.7	745.3	*573.9*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Tabla A.2. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de San Gregorio durante el Período 1982-2002.

Precipitación Mensual Registrada en San Gregorio *(mm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	0.0	9.0	33.4	11.9	0.0	16.5	0.0	6.5
Febrero	115.0	0.0	0.7	12.1	12.3	18.9	0.0	10.5
Marzo	0.0	0.0	2.5	14.2	1.0	0.0	22.5	0.0
Abril	10.0	0.0	0.0	0.7	8.2	0.0	0.0	0.0
Mayo	65.0	163.0	60.4	10.8	15.7	28.5	0.0	5.4
Junio	87.5	90.5	265.3	308.4	241.4	277.3	260.9	100.6
Julio	275.8	242.9	363.7	292.7	306.5	426.1	237.2	216.5
Agosto	380.5	269.5	286.1	248.3	227.6	292.5	301.1	180.3
Septiembre	154.4	305.5	319.3	254.4	242.9	223.7	186.2	186.6
Octubre	58.1	139.4	33.2	106.7	149.0	226.0	20.4	124.7
Noviembre	126.2	45.3	3.0	24.7	5.7	15.8	0.0	0.0
Diciembre	37.5	15.2	22.0	3.1	15.0	0.0	0.0	51.3
Total	1,310.0	1,280.3	1,389.6	1,288.0	1,225.3	1,525.3	1,028.3	882.4
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	0.0	6.4	434.3	15.2	4.4	0.0	0.0	5.7
Febrero	18.3	0.0	16.2	0.0	0.0	6.8	0.0	0.0
Marzo	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.8
Abril	15.1	0.0	26.6	0.0	0.0	2.0	0.0	42.1
Mayo	48.7	6.4	62.2	15.6	32.6	67.6	59.0	77.0
Junio	212.3	232.5	52.6	327.4	212.7	219.0	219.5	195.8
Julio	277.6	251.0	227.9	257.6	171.0	265.1	208.1	360.3
Agosto	274.0	192.4	347.7	395.2	287.5	477.9	271.8	170.2
Septiembre	243.9	200.9	212.1	253.3	177.0	247.7	190.3	212.6
Octubre	124.7	83.6	212.7	135.2	125.4	21.8	208.0	130.7
Noviembre	3.2	61.0	28.7	9.8	27.6	24.2	12.3	72.8
Diciembre	18.5	26.0	0.0	0.0	0.0	8.5	5.8	0.0
Total	1,248.9	1,060.2	1,621.0	1,409.3	1,038.2	1,340.6	1,174.8	1,301.0
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	18.6	0.0	0.0	0.0	40.2	*28.7*	93.6	3.3
Febrero	0.0	7.7	0.0	0.0	29.7	*11.8*	25.1	2.1
Marzo	0.0	19.2	0.0	31.6	0.0	*6.5*	11.1	1.7
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*5.0*	10.9	2.2
Mayo	0.0	38.3	58.0	45.5	55.2	*43.6*	36.9	0.8
Junio	143.4	193.8	276.2	303.4	208.2	*210.9*	77.2	0.4
Julio	289.2	261.8	208.8	375.7	250.8	*274.6*	62.9	0.2
Agosto	323.1	362.6	220.6	304.5	275.9	*290.0*	74.9	0.3
Septiembre	358.7	242.2	163.0	164.0	254.5	*228.2*	53.4	0.2
Octubre	97.8	69.8	108.5	94.3	230.3	*119.1*	62.3	0.5
Noviembre	35.0	5.3	37.4	0.0	104.7	*30.6*	34.8	1.1
Diciembre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*9.7*	14.4	1.5
Total	1,265.8	1,200.7	1,072.5	1,319.0	1,449.5	*1,258.6*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Tabla A.3. Precipitación Mensual Registrada en la Estación Meteorológica de Ciudad Guzmán durante el Período 1982-2002.

Precipitación Mensual Registrada en Ciudad Guzmán *(mm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	27.7	7.5	42.1	0.4	0.0	6.6	2.6	0.0
Febrero	0.9	0.0	0.8	1.2	5.8	13.4	0.0	0.0
Marzo	0.0	0.0	1.0	1.5	0.0	0.0	15.5	0.0
Abril	1.6	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
Mayo	32.5	117.7	34.5	22.7	5.3	8.0	0.0	1.7
Junio	46.4	88.6	100.3	93.0	292.3	146.7	207.7	79.3
Julio	157.4	171.6	177.0	136.8	175.2	268.9	164.6	226.7
Agosto	175.3	161.0	138.0	194.8	88.1	100.0	168.3	67.0
Septiembre	93.5	140.2	167.9	95.8	202.3	67.0	189.3	174.3
Octubre	50.9	47.0	53.0	38.0	105.6	3.6	43.1	75.7
Noviembre	91.7	16.4	0.0	14.2	0.0	3.2	0.0	3.8
Diciembre	32.1	1.4	16.3	0.0	0.0	1.0	11.4	6.0
Total	709.9	751.4	730.9	598.4	874.8	618.4	802.5	634.5
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	27.7	4.5	420.2	8.0	0.0	0.0	0.0	5.3
Febrero	3.9	0.0	11.6	0.0	0.0	4.2	0.0	0.0
Marzo	3.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	40.8
Abril	1.4	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5
Mayo	26.3	10.0	13.7	0.0	4.7	39.1	35.6	48.4
Junio	121.1	158.0	8.1	263.4	75.7	159.9	156.9	105.5
Julio	123.8	177.2	113.5	213.9	100.4	89.9	84.0	146.2
Agosto	95.2	125.4	239.5	227.7	150.8	290.9	195.2	120.5
Septiembre	134.6	139.9	116.1	142.5	65.4	139.9	154.8	107.3
Octubre	84.0	57.3	209.4	104.7	55.1	21.3	130.1	127.5
Noviembre	2.7	22.4	9.4	14.0	25.1	20.4	15.9	31.9
Diciembre	7.9	13.6	18.1	0.0	0.7	6.9	0.0	0.0
Total	632.3	708.3	1,169.4	974.2	477.9	772.5	772.5	749.9
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	0.0	0.0	0.0	0.0	28.7	*27.7*	90.8	3.3
Febrero	0.0	18.0	0.0	0.0	21.7	*3.9*	6.6	1.7
Marzo	0.0	1.7	0.0	13.4	0.0	*3.7*	9.5	2.6
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*1.4*	4.1	2.9
Mayo	0.0	21.4	59.9	29.3	41.9	*26.3*	27.4	1.0
Junio	117.1	159.1	125.6	102.8	106.5	*129.2*	66.0	0.5
Julio	173.9	169.7	128.6	182.0	104.3	*156.5*	46.5	0.3
Agosto	191.8	147.8	142.3	94.5	142.2	*155.1*	55.4	0.4
Septiembre	220.0	187.4	116.4	139.6	109.2	*138.3*	42.0	0.3
Octubre	32.1	10.0	32.6	51.6	89.6	*67.7*	48.1	0.7
Noviembre	13.1	6.1	0.4	0.0	81.8	*17.7*	24.8	1.4
Diciembre	0.0	0.0	11.2	0.0	0.0	*6.0*	8.5	1.4
Total	748.0	721.2	617.0	613.2	725.9	*733.5*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Tabla A.4. Precipitación Mensual Ponderada sobre la Cuenca del Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002.

Precipitación Mensual Ponderada sobre la Cuenca del Lago de Zapotlán *(mm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	22.4	7.9	39.8	2.3	0.0	8.1	2.1	1.0
Febrero	19.1	0.0	0.8	3.0	6.8	14.6	0.0	1.7
Marzo	0.0	0.0	1.2	3.6	0.2	0.0	16.5	0.0
Abril	2.9	0.0	0.0	0.1	1.6	0.1	0.0	0.1
Mayo	36.8	122.9	37.9	20.1	7.3	11.5	0.0	2.2
Junio	52.9	87.4	128.2	133.3	282.2	168.4	214.4	82.7
Julio	176.9	185.0	205.7	163.5	197.7	292.5	175.9	223.0
Agosto	206.1	176.8	161.8	201.0	110.8	131.3	189.0	84.4
Septiembre	102.4	164.5	189.1	119.8	204.7	91.8	187.0	174.0
Octubre	53.2	61.2	48.9	47.9	111.3	39.1	38.2	82.1
Noviembre	97.4	20.7	0.6	16.0	1.1	5.2	0.0	3.3
Diciembre	33.5	3.6	17.3	0.5	2.7	0.8	9.3	13.3
Total	803.8	830.1	831.1	711.1	926.2	763.3	832.4	667.9
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	22.7	4.7	419.8	9.9	0.7	0.1	0.0	5.4
Febrero	6.2	0.0	12.1	0.0	0.0	4.8	0.0	0.0
Marzo	5.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	39.5
Abril	3.6	0.1	12.7	0.0	0.0	0.3	0.0	20.8
Mayo	29.4	9.6	21.6	2.6	9.5	42.6	39.6	52.0
Junio	133.9	168.5	15.8	268.8	97.9	169.7	166.3	118.9
Julio	146.9	185.9	131.3	222.0	111.2	119.5	104.3	180.4
Agosto	122.8	138.0	253.4	252.0	172.3	319.1	205.6	127.0
Septiembre	149.3	147.1	130.2	158.5	83.3	156.1	157.0	121.8
Octubre	88.9	60.2	207.0	107.7	65.9	21.3	140.1	126.9
Noviembre	2.7	28.7	12.3	12.9	25.1	20.8	15.2	38.6
Diciembre	9.4	16.3	15.3	0.4	0.7	7.2	0.9	0.0
Total	720.9	759.1	1,231.6	1,034.8	566.5	861.6	829.1	831.4
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	3.0	0.0	0.0	0.0	29.7	*27.6*	90.6	3.3
Febrero	0.0	15.9	0.0	0.0	22.9	*5.1*	7.3	1.4
Marzo	0.0	4.6	0.0	16.2	0.0	*4.1*	9.5	2.3
Abril	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	*2.0*	5.2	2.6
Mayo	0.0	23.7	60.4	32.7	44.2	*28.9*	28.1	1.0
Junio	119.9	161.5	149.4	133.9	124.9	*141.9*	62.5	0.4
Julio	190.7	181.9	137.9	211.7	130.5	*175.0*	44.7	0.3
Agosto	209.0	181.3	154.6	130.6	161.4	*175.6*	54.9	0.3
Septiembre	241.1	194.7	123.1	141.5	133.0	*151.0*	39.0	0.3
Octubre	43.8	20.4	44.5	58.0	112.5	*75.2*	45.5	0.6
Noviembre	16.2	6.1	6.4	0.0	83.1	*19.6*	25.8	1.3
Diciembre	0.0	0.3	9.1	0.0	0.0	*6.7*	8.6	1.3
Total	823.7	790.4	685.3	724.6	842.3	*812.7*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Para la construcción de la Tabla A.4., se usaron los factores de ponderación del *3%* para los datos de la estación de Atoyac, *16%* para los datos correspondientes a la estación de San Gregorio, y *81%* para los datos de la estación de Ciudad Guzmán. Tales factores fueron determinados siguiendo el método de Thiessen en función del área de los polígonos irregulares asignados por tal método a cada estación para la cuenca de interés (Fetter, C. W., 2001).

ANEXO B. DATOS HIDROMÉTRICOS ÚTILES PARA EL BALANCE VOLUMÉTRICO DEL LAGO DE ZAPOTLÁN

Tabla B.1. Altitudes de la Superficie del Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002.

Altitudes de la superficie del Lago de Zapotlán *(msnm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	---	1,497.70	1,497.85	1,497.86	1,497.30	1,497.94	1,497.60	1,497.76
Febrero	---	1,497.54	1,497.77	1,497.67	1,497.07	1,497.75	1,497.39	1,497.55
Marzo	---	1,497.34	1,497.55	1,497.44	1,496.84	1,497.59	1,497.15	1,497.34
Abril	---	1,497.02	1,497.21	1,497.12	1,496.45	1,497.29	1,496.90	1,497.02
Mayo	---	1,496.59	1,496.80	1,496.72	1,496.00	1,496.93	1,496.51	1,496.61
Junio	1,496.50	1,496.66	1,496.55	1,496.35	1,495.56	1,496.60	1,496.10	1,496.21
Julio	1,496.51	1,496.82	1,496.83	1,496.64	1,496.74	1,496.98	1,496.77	1,496.32
Agosto	1,496.97	1,497.27	1,497.36	1,497.00	1,497.29	1,497.63	1,497.21	1,496.88
Septiembre	1,497.44	1,497.66	1,497.70	1,497.40	1,497.50	1,497.83	1,497.64	1,497.00
Octubre	1,497.61	1,498.01	1,498.11	1,497.58	1,498.00	1,497.94	1,498.05	1,497.34
Noviembre	1,497.62	1,498.06	1,498.12	1,497.57	1,498.22	1,497.86	1,498.03	1,497.41
Diciembre	1,497.74	1,498.01	1,497.98	1,497.48	1,498.09	1,497.74	1,497.90	1,497.31
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	1,497.14	1,497.03	1,497.21	1,497.99	1,499.08	1,498.21	1,498.56	1,498.70
Febrero	1,496.97	1,496.83	1,497.55	1,497.85	1,498.94	1,498.02	1,498.39	1,498.56
Marzo	1,496.75	1,496.58	1,497.38	1,497.65	1,498.74	1,497.84	1,498.17	1,498.35
Abril	1,496.38	1,496.19	1,497.10	1,497.34	1,498.47	1,497.54	1,497.88	1,498.20
Mayo	1,495.92	1,495.66	1,496.60	1,497.00	1,498.13	1,497.20	1,497.55	1,498.00
Junio	1,495.55	1,495.18	1,496.37	1,496.64	1,497.86	1,497.02	1,497.35	1,497.90
Julio	1,496.05	1,495.94	1,496.65	1,497.48	1,497.91	1,497.41	1,497.72	1,498.10
Agosto	1,496.50	1,496.58	1,497.08	1,498.12	1,498.04	1,497.50	1,497.89	1,498.47
Septiembre	1,496.79	1,496.92	1,497.57	1,498.77	1,498.30	1,498.43	1,498.36	1,498.69
Octubre	1,497.13	1,497.27	1,497.88	1,499.08	1,498.37	1,498.74	1,498.66	1,498.89
Noviembre	1,497.27	1,497.34	1,498.15	1,499.25	1,498.40	1,498.68	1,498.90	1,499.08
Diciembre	1,497.16	1,497.31	1,498.09	1,499.18	1,498.34	1,498.64	1,498.83	1,499.07
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	1,498.95	1,498.94	1,498.82	1,498.51	1,498.31	*1,498.07*	0.64	4.30E-04
Febrero	1,498.77	1,498.77	1,498.65	1,498.34	1,498.20	*1,497.93*	0.63	4.21E-04
Marzo	1,498.58	1,498.62	1,498.45	1,498.14	1,498.08	*1,497.73*	0.65	4.31E-04
Abril	1,498.28	1,498.34	1,498.15	1,497.91	1,497.80	*1,497.43*	0.68	4.55E-04
Mayo	1,497.95	1,498.00	1,497.82	1,497.59	1,497.48	*1,497.05*	0.74	4.97E-04
Junio	1,497.65	1,497.77	1,497.71	1,497.40	1,497.31	*1,496.77*	0.81	5.38E-04
Julio	1,497.83	1,498.07	1,497.97	1,497.61	1,497.54	*1,497.14*	0.68	4.52E-04
Agosto	1,498.24	1,498.45	1,498.21	1,498.03	1,497.81	*1,497.55*	0.60	4.01E-04
Septiembre	1,498.67	1,498.76	1,498.49	1,498.24	1,498.15	*1,497.92*	0.62	4.17E-04
Octubre	1,499.12	1,499.09	1,498.67	1,498.52	1,498.42	*1,498.21*	0.61	4.10E-04
Noviembre	1,499.12	1,499.04	1,498.68	1,498.55	1,498.59	*1,498.28*	0.62	4.14E-04
Diciembre	1,499.06	1,498.96	1,498.60	1,498.45	1,498.72	*1,498.22*	0.63	4.20E-04

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Tabla B.2. Contribuciones Volumétricas de las Descargas Residuales de los Municipios de *Gómez Farías* y de *Zapotlán el Grande* al Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002.

Aportaciones de descargas de aguas residuales al Lago de Zapotlán *(m^3)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	—	286,851	291,198	295,612	300,095	304,647	309,269	313,963
Febrero	—	286,851	291,198	295,612	300,095	304,647	309,269	313,963
Marzo	—	327,829	332,798	337,843	342,966	348,168	353,451	358,815
Abril	—	368,808	374,397	380,073	385,837	391,689	397,632	403,667
Mayo	—	409,787	415,997	422,303	428,707	435,210	441,813	448,518
Junio	750,227	761,888	773,732	785,762	797,981	810,392	822,998	835,802
Julio	600,181	609,510	618,985	628,609	638,385	648,314	658,399	668,642
Agosto	675,204	685,699	696,359	707,186	718,183	729,353	740,698	752,222
Septiembre	675,204	685,699	696,359	707,186	718,183	729,353	740,698	752,222
Octubre	600,181	609,510	618,985	628,609	638,385	648,314	658,399	668,642
Noviembre	600,181	609,510	618,985	628,609	638,385	648,314	658,399	668,642
Diciembre	282,569	286,851	291,198	295,612	300,095	304,647	309,269	313,963
Total	4,183,748	5,928,791	6,020,191	6,113,018	6,207,296	6,303,047	6,400,294	6,499,061
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	318,729	323,569	328,484	333,475	338,542	343,689	348,915	354,222
Febrero	318,729	323,569	328,484	333,475	338,542	343,689	348,915	354,222
Marzo	364,262	369,793	375,410	381,114	386,906	392,787	398,760	404,825
Abril	409,795	416,017	422,336	428,753	435,269	441,886	448,605	455,428
Mayo	455,327	462,241	469,263	476,392	483,632	490,984	498,450	506,031
Junio	848,808	862,018	875,435	889,064	902,906	916,967	931,248	945,754
Julio	679,046	689,614	700,348	711,251	722,325	733,573	744,998	756,603
Agosto	763,927	775,816	787,892	800,157	812,616	825,270	838,123	851,179
Septiembre	763,927	775,816	787,892	800,157	812,616	825,270	838,123	851,179
Octubre	679,046	689,614	700,348	711,251	722,325	733,573	744,998	756,603
Noviembre	679,046	689,614	700,348	711,251	722,325	733,573	744,998	756,603
Diciembre	318,729	323,569	328,484	333,475	338,542	343,689	348,915	354,222
Total	6,599,372	6,701,251	6,804,723	6,909,813	7,016,547	7,124,950	7,235,049	7,346,871
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	359,611	365,083	370,641	376,284	382,015	*332,245*	29,618	8.9E-02
Febrero	359,611	365,083	370,641	376,284	382,015	*332,245*	29,618	8.9E-02
Marzo	410,984	417,238	423,589	430,039	436,588	*379,708*	33,850	8.9E-02
Abril	462,357	469,393	476,538	483,794	491,162	*427,172*	38,081	8.9E-02
Mayo	513,730	521,548	529,487	537,548	545,735	*474,635*	42,312	8.9E-02
Junio	960,488	975,454	990,656	1,006,096	1,021,780	*879,307*	84,204	9.6E-02
Julio	768,391	780,363	792,525	804,877	817,424	*703,446*	67,363	9.6E-02
Agosto	864,440	877,909	891,590	905,487	919,602	*791,377*	75,784	9.6E-02
Septiembre	864,440	877,909	891,590	905,487	919,602	*791,377*	75,784	9.6E-02
Octubre	768,391	780,363	792,525	804,877	817,424	*703,446*	67,363	9.6E-02
Noviembre	768,391	780,363	792,525	804,877	817,424	*703,446*	67,363	9.6E-02
Diciembre	359,611	365,083	370,641	376,284	382,015	*329,879*	30,837	9.3E-02
Total	7,460,442	7,575,791	7,692,945	7,811,933	7,932,784	*6,848,282*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

Tabla B.3. Pérdidas de Agua por Evaporación en el Lago de Zapotlán durante el Período 1982-2002.

Evaporación en el Lago de Zapotlán *(mm)*								
Año	**1982**	**1983**	**1984**	**1985**	**1986**	**1987**	**1988**	**1989**
Enero	---	87.7	120.8	118.9	135.4	126.2	130.7	128.9
Febrero	---	128.2	149.6	155.7	159.9	119.4	149.9	141.6
Marzo	---	193.7	217.5	216.4	217.6	195.4	174.2	196.3
Abril	---	241.4	251.6	231.3	203.7	209.9	199.7	223.8
Mayo	---	209.6	209.8	242.3	191.6	209.1	214.0	232.2
Junio	183.9	161.6	154.1	131.6	156.9	135.9	159.6	183.8
Julio	116.8	124.1	85.3	115.8	135.1	136.9	123.3	123.8
Agosto	132.3	122.1	115.2	130.1	144.5	124.2	116.1	124.4
Septiembre	124.4	81.5	95.6	121.7	114.0	129.9	120.9	117.7
Octubre	134.6	101.9	123.1	124.3	119.1	151.5	135.8	130.1
Noviembre	117.6	95.7	125.1	127.5	114.5	120.6	121.8	104.9
Diciembre	78.9	107.3	122.8	115.9	105.6	91.1	114.4	128.9
Total	888.6	1,654.9	1,770.5	1,831.7	1,797.9	1,750.1	1,760.3	1,836.4
Año	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**
Enero	110.1	105.0	48.7	94.5	109.5	103.0	92.6	104.2
Febrero	136.2	130.3	109.3	133.0	140.2	128.3	142.4	138.5
Marzo	195.1	202.0	174.6	197.6	207.3	201.0	191.0	151.1
Abril	210.7	209.0	179.0	202.4	209.4	215.1	217.4	138.3
Mayo	193.0	201.8	150.7	227.0	196.4	196.1	201.8	148.7
Junio	119.4	133.7	149.5	145.1	131.1	125.6	109.6	125.5
Julio	108.3	102.9	105.8	109.4	115.8	109.1	122.8	113.2
Agosto	97.8	115.2	103.0	103.2	100.5	91.6	102.9	109.3
Septiembre	89.5	88.3	88.2	107.0	104.9	91.2	111.6	97.4
Octubre	104.9	103.0	85.5	109.9	102.2	131.3	100.1	109.4
Noviembre	104.9	92.2	85.1	94.3	99.2	91.5	109.4	95.2
Diciembre	96.9	80.5	81.1	99.1	87.5	72.3	99.4	101.3
Total	1,566.9	1,563.9	1,360.3	1,622.5	1,604.1	1,555.9	1,601.0	1,432.1
Año	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	***Promedio aritmético***	**Desviación Estándar**	**Coeficiente de Variación**
Enero	129.6	121.8	124.7	96.7	107.3	*109.8*	20.2	1.8E-01
Febrero	150.9	142.7	145.8	119.4	115.6	*136.8*	13.8	1.0E-01
Marzo	200.3	203.0	196.5	172.8	183.4	*194.3*	16.6	8.5E-02
Abril	218.7	218.9	217.3	209.6	204.5	*210.6*	22.9	1.1E-01
Mayo	210.8	206.7	157.5	175.0	201.9	*198.8*	24.9	1.3E-01
Junio	162.6	131.3	84.8	116.9	144.0	*140.3*	23.9	1.7E-01
Julio	120.3	112.0	102.2	105.9	96.9	*113.6*	12.2	1.1E-01
Agosto	105.3	107.5	105.3	103.0	124.9	*113.3*	13.3	1.2E-01
Septiembre	88.7	105.8	100.5	92.2	103.2	*103.5*	14.0	1.4E-01
Octubre	101.5	116.4	87.1	112.4	106.5	*113.8*	16.7	1.5E-01
Noviembre	105.8	111.1	97.7	102.9	77.1	*104.5*	13.5	1.3E-01
Diciembre	102.3	108.8	80.1	92.0	84.7	*97.7*	15.4	1.6E-01
Total	1,696.6	1,685.8	1,499.4	1,498.8	1,549.8	*1,637.0*		

Fuente: Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003) de la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento [CEAS], con datos de la Comisión Nacional del Agua [CNA].

ANEXO C. TÉCNICAS DE PRESERVACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS DE CALIDAD DEL AGUA

Tabla C.1. Técnicas de Preservación de Muestras para el Análisis de Parámetros Específicos de Calidad del Agua. (Tomada de Jiménez, B. E., 2001.)

Parámetro	Envase	Tamaño mímino de muestra *(mL)*	Técnica de Preservación	Tiempo Máximo de Almacenamiento
Acidez	Plástico Vidrio de Borosilicato	100	Refrigeración	24 horas
Alcalinidad	Plástico Vidrio	200	Refrigeración	24 horas
Cloro residual	Plástico Vidrio	500	Análisis Inmediato	30 minutos
Color	Plástico Vidrio	500	Refrigeración	48 horas
Conductividad	Plástico Vidrio	500	Refrigeración	28 días
Carbono Orgánico Total	Plástico Vidrio	100	Análisis Inmediato o Refrigeración con HCl a pH < 2	7 días
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Plástico Vidrio	1000	Refrigeración	6 horas
Demanda Química de	Plástico Vidrio	100	Análisis Inmediato o Refrigeración con H_2SO_4 a pH < 2	7 días
Dureza	Plástico Vidrio	100	HNO_3 a pH < 2	6 meses
Fenoles	Plástico Vidrio	500	Refrigeración con H_2SO_4 a pH < 2	---
Grasas y aceites	Vidrio Frasco de boca ancha calibrado	1000	H_2SO_4 a pH < 2	28 días
Metales	Plástico enjuagado con HNO_3 al 1:1 Vidrio enjuagado con HNO_3 al 1:1	---	Para los disueltos, filtración inmediata y adición de HNO_3 a pH < 2	6 meses
Microbiológicos	Plástico Esterilizado Vidrio Esterilizado	100 a 1000 (dejar 2.5cm de bordo libre para aeración).	Na_2SO_3 para muestras con cloro. EDTA para muestras con metales. Baja temperatura en todos los casos.	< 4 horas
Nitratos	Plástico Vidrio	100	Análisis Inmediato o Refrigeración	48 horas
Nitritos	Plástico Vidrio	200	Análisis Inmediato o Refrigeración	---
Nitrógeno Amoniacal	Plástico Vidrio	500	Análisis Inmediato o Refrigeración con H_2SO_4 a pH < 2	7 días
Nitrógeno Total Kjeldahl	Plástico Vidrio	500	Refrigeración con H_2SO_4 a pH < 2	7 días
Olor	Vidrio	500	Análisis Inmediato o Refrigeración	6 horas
Oxígeno Disuelto	Vidrio Botella de DBO	300	Análisis Inmediato por electrodo	30 minutos
Pesticidas	Vidrio	---	Refrigeración (usar 1000mg de ácido ascróbico por litro de muestra si hay cloro residual)	7 días
pH	Plástico Vidrio	--	Análisis Inmediato	2 horas
Sólidos	Plástico Vidrio	---	Refrigeración	7 días
Temperatura	Plástico Vidrio	---	Análisis Inmediato	Menos de 1 minuto
Turbiedad	Plástico Vidrio	---	Refrigeración en la obscuridad	24 horas

ANEXO D. RESULTADOS DE LOS MONITOREOS DE CALIDAD DEL AGUA DEL LAGO DE ZAPOTLÁN HECHOS POR CIATEJ, A. C. EN 2003

A continuación, se incluyen los resultados de los análisis de calidad del agua efectuados por el Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. [CIATEJ, A. C.] los días 8 de mayo (orden de trabajo no. 33079 con no. de folio 1711 y 1712) y 19 de septiembre de 2003 (orden de trabajo no. 34138 con no. de folio 1835 y 1836). En todos los casos, además de los análisis correspondientes, las muestras de agua fueron tomadas y transportadas por personal técnico del CIATEJ, A. C.

Tabla D.1. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 1.

Punto de monitoreo: 1			
Latitud Norte:	**19°45'43"**		
Longitud Oeste:	**103°28'30"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	110.79	85.89	mg/L
Fósforo total.	0.80	0.89	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.41	0.46	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	454.44	247.30	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.99	1.29	mg/L
Turbidez.	84.90	70.70	NTU
Conductividad.	928	798	µh/cm
Dureza total.	200.43	184.63	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	6.36	9.39	mg/L
Salinidad.	928	798	µh/cm
pH.	8.94	9.75	U.P.
Temperatura.	26.00	26.00	°C
Sólidos disueltos totales.	440.00	359.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	0.68	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	4	130	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	< 2	8	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	< 2	8	NMP/g

Tabla D.2. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 2.

Punto de monitoreo:	2		
Latitud Norte:	**19°45'49"**		
Longitud Oeste:	**103°28'50"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	106.48	82.22	mg/L
Fósforo total.	0.63	1.11	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.37	0.54	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	181.77	296.77	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.02	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.99	1.44	mg/L
Turbidez.	83.60	46.10	NTU
Conductividad.	923	792	µh/cm
Dureza total.	206.39	177.79	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	5.30	6.59	mg/L
Salinidad.	923	792	µh/cm
pH.	8.91	9.64	U.P.
Temperatura.	27.00	26.00	°C
Sólidos disueltos totales.	438.00	356.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	4	230	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	< 2	20	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	< 2	20	NMP/g

Tabla D.3 Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 3.

Punto de monitoreo:	3		
Latitud Norte:	**19°45'41"**		
Longitud Oeste:	**103°29'10"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	107.92	82.22	mg/L
Fósforo total.	0.67	1.15	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.37	0.85	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	181.77	247.30	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.03	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.85	1.34	mg/L
Turbidez.	81.60	51.20	NTU
Conductividad.	919	800	µh/cm
Dureza total.	206.39	179.28	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	5.15	6.92	mg/L
Salinidad.	919	800	µh/cm
pH.	9.03	9.68	U.P.
Temperatura.	26.00	27.00	°C
Sólidos disueltos totales.	437.00	360.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	11	120	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	< 2	20	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	< 2	20	NMP/g

Tabla D.4. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 4.

Punto de monitoreo: 4			
Latitud Norte:	**19°45'22"**		
Longitud Oeste:	**103°29'18"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	109.36	84.43	mg/L
Fósforo total.	0.98	0.85	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.54	0.41	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.66	346.23	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.02	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.99	1.44	mg/L
Turbidez.	88.60	89.20	NTU
Conductividad.	923	797	µh/cm
Dureza total.	198.45	176.61	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	6.06	9.56	mg/L
Salinidad.	923	797	µh/cm
pH.	8.86	9.73	U.P.
Temperatura.	24.00	26.00	°C
Sólidos disueltos totales.	439.00	359.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	14	240	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	2	34	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	2	17	NMP/g

Tabla D.5. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 5.

Punto de monitoreo: 5			
Latitud Norte:	**19°45'02"**		
Longitud Oeste:	**103°29'10"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	105.76	85.80	mg/L
Fósforo total.	0.89	0.81	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.50	0.32	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.66	197.84	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	1.28	1.39	mg/L
Turbidez.	85.60	63.80	NTU
Conductividad.	919	790	µh/cm
Dureza total.	218.29	179.29	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	5.60	12.37	mg/L
Salinidad.	919	790	µh/cm
pH.	8.74	9.86	U.P.
Temperatura.	26.00	25.00	°C
Sólidos disueltos totales.	437.00	356.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	4	80	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	< 2	9	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli*.	< 2	4	NMP/g

Tabla D.6. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 6.

Punto de monitoreo:	6		
Latitud Norte:	**19°44'54"**		
Longitud Oeste:	**103°28'50"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	108.64	85.16	mg/L
Fósforo total.	1.28	0.94	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.80	0.63	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.66	247.30	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.02	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.99	1.29	mg/L
Turbidez.	72.60	87.40	NTU
Conductividad.	915	788	µh/cm
Dureza total.	202.42	177.94	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	3.03	13.35	mg/L
Salinidad.	915	788	µh/cm
pH.	8.69	9.92	U.P.
Temperatura.	27.00	26.00	°C
Sólidos disueltos totales.	435.00	355.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	17	110	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	4	20	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli*.	4	20	NMP/g

Tabla D.7. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 7.

Punto de monitoreo:	7		
Latitud Norte:	**19°45'02"**		
Longitud Oeste:	**103°28'30"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	107.92	85.16	mg/L
Fósforo total.	0.63	1.51	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.45	0.85	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	363.55	197.84	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.03	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	0.85	1.14	mg/L
Turbidez.	71.70	48.60	NTU
Conductividad.	922	788	µh/cm
Dureza total.	214.33	173.93	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	3.94	12.36	mg/L
Salinidad.	922	788	µh/cm
pH.	8.62	9.85	U.P.
Temperatura.	25.00	27.00	°C
Sólidos disueltos totales.	439.00	356.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	0.167	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	4	3,000	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	< 2	1,300	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	< 2	1,300	NMP/g

Tabla D.8. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 8.

Punto de monitoreo:	8		
Latitud Norte:	**19°45'22"**		
Longitud Oeste:	**103°28'50"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	106.48	85.16	mg/L
Fósforo total.	1.51	1.68	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.98	0.89	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.66	197.84	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.03	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	1.14	1.34	mg/L
Turbidez.	63.90	66.20	NTU
Conductividad.	903	792	µh/cm
Dureza total.	206.39	181.96	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	4.85	12.03	mg/L
Salinidad.	903	792	µh/cm
pH.	8.65	9.80	U.P.
Temperatura.	27.00	27.00	°C
Sólidos disueltos totales.	428.00	357.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	2	130	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	2	20	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	2	< 20	NMP/g

Tabla D.9. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 9.

Punto de monitoreo:	9		
Latitud Norte:	**19°45'22"**		
Longitud Oeste:	**103°28'22"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	113.68	85.16	mg/L
Fósforo total.	0.85	1.16	mg/L
Fósforo disuelto total.	0.81	0.67	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	272.66	346.23	mg/L
Nitratos.	< 0.05	< 0.05	mg/L
Nitritos.	< 0.01	0.03	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	1.14	1.39	mg/L
Turbidez.	71.10	96.70	NTU
Conductividad.	905	788	µh/cm
Dureza total.	198.45	172.59	mg/L como $CaCO_3$
Oxígeno disuelto.	4.39	16.32	mg/L
Salinidad.	905	788	µh/cm
pH.	8.86	9.88	U.P.
Temperatura.	25.00	26.00	°C
Sólidos disueltos totales.	429.00	355.00	mg/L
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	13	240	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	13	17	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	13	14	NMP/g

Tabla D.10. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 10.

Punto de monitoreo:	10 (Canal de aguas residuales de Ciudad Guzmán, Zapotlán el Grande)		
Latitud Norte:	**19°44'09"**		
Longitud Oeste:	**103°29'07"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	100.73	54.33	mg/L
Fósforo total.	47.91	5.71	mg/L
Fósforo disuelto total.	36.09	3.96	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	1,181.54	1,236.52	mg/L
Nitratos.	29.61	< 0.05	mg/L
Nitritos.	0.19	< 0.01	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	25.48	31.72	mg/L
Turbidez.	180.00	83.20	NTU
Oxígeno disuelto.	< 0.15	< 0.16	mg/L
Sólidos disueltos totales.	505.00	349.00	µh/cm
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	> 16,000,000	> 16,000,000	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	260,000	260,000	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	260,000	200,000	NMP/g

Tabla D.11. Análisis de Calidad del Agua para las Muestras Tomadas en el Punto de Monitoreo Número 11.

Punto de monitoreo:	11 (Canal de aguas residuales de San Sebastián, Gómez Farías)		
Latitud Norte:	**19°46'24"**		
Longitud Oeste:	**103°29'07"**		
Determinaciones	**Resultados (2003)**		**Unidades**
	Mayo 08	**Septiembre 19**	
Cloro residual.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Cloruros.	54.68	13.21	mg/L
Fósforo total.	46.16	5.49	mg/L
Fósforo disuelto total.	38.72	3.69	mg/L
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).	1,363.32	1,088.14	mg/L
Nitratos.	24.11	< 0.05	mg/L
Nitritos.	0.13	< 0.01	mg/L
Nitrógeno orgánico total.	27.33	33.66	mg/L
Turbidez.	176.00	146.00	NTU
Oxígeno disuelto.	< 0.15	< 0.16	mg/L
Sólidos disueltos totales.	383.00	138.00	µh/cm
Cromo total.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Mercurio.	< 0.01	< 0.01	mg/L
Plomo.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Arsénico.	< 0.10	< 0.10	mg/L
Organismos coliformes totales.	2,800,000	2,800,000	NMP/100mL
Organismos coliformes fecales.	140,000	1,700,000	NMP/100mL
Detección de *Escherichia coli.*	140,000	1,700,000	NMP/g

ANEXO E. PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD Y TOMA DE DECISIONES EN CUANTO A ALTERNATIVAS DE CONTROL DE EUTROFICACIÓN

A continuación, se describe una metodología desarrollada por el autor de esta tesis para evaluar la viabilidad de las alternativas disponibles para el control de la eutroficación en cuerpos de agua, y auxiliar así en el proceso de toma de decisiones a las autoridades encargadas de la planeación estratégica y manejo de cuerpos de agua.

La metodología propuesta supone la identificación previa de las partes involucradas en la problemática de la eutroficación en el cuerpo de agua de interés, es decir, identificar a los actores sociales relacionados directa o indirectamente con las causas, síntomas y efectos de la eutroficación, así como con la implementación de técnicas de amortiguación, remediación y/o control del fenómeno. Una vez identificadas las partes involucradas, es necesario llevar a cabo una serie de talleres de trabajo grupal moderados por un consultor externo. Es conveniente el trabajo grupal con todas las partes involucradas, pues de esta forma las decisiones y consensos acordados como grupo cuentan con mayor solidez y sustento ante la opinión pública (Susskind, L., Levy, P.F. & Thomas-Larmer, J., 2000). El primero de los talleres puede ser de sensibilización a fin de preparar a todas las partes involucradas con la misma información para dar entrada a las posteriores sesiones de trabajo. Cabe señalar que conviene iniciar cada sesión de taller con un recuento de los resultados de la sesión anterior.

De esta forma, se propone la planeación en torno a la estrategia de control de eutroficación mediante el análisis de las alternativas disponibles en una matriz de decisión. Dicha matriz de decisión consiste en la evaluación de cada alternativa con respecto a los criterios de dos *variables de decisión*, a saber: *impacto benéfico* y *factibilidad*.

Para cada una de las variables de decisión, mediante sesiones de trabajo grupal, es necesario acordar en primera instancia sus respectivos *criterios de ponderación* bajo los cuales se analizarán las alternativas que se identifiquen para la prevención o control de la eutroficación. Los criterios sugeridos de ponderación se describen a continuación para ambas variables de decisión.

Los criterios de ponderación la variable de *impacto benéfico* se proponen en seguida:

a) *Ambiental / salud:* entendido como beneficios en cuanto a la minimización de riesgos (a mayor beneficio ambiental o de salud, menor riesgo de incidentes resultantes en un incremento en el nivel de eutroficación, contaminación del agua, o enfermedades asociadas con el contacto humano con agua contaminada), así como al incremento de la productividad biológica del lago, entendida como el aumento de individuos de especies de peces en el lago.
b) *Económico:* entendido como que a mayor beneficio económico la alternativa implicaría un menor costo de implementación. Asimismo, podrían incorporarse en este criterio el potencial de desarrollo ecoturístico del lago interpretado indirectamente a través de intangibles tales como la recuperación de valores estéticos.
c) *Político:* entendido intuitivamente como que a mayor beneficio político se tendría una mejor relación entre las autoridades y los actores políticos de la esfera nacional, estatal y/o municipal interesados en la problemática del lago.
d) *Social:* entendido como que a mayor beneficio social, se tendría una mejor imagen ante la comunidad y mayor apoyo de la sociedad civil, organizaciones no gubernamentales e incluso medios de comunicación.

En forma similar, los criterios sugeridos de ponderación la variable de *factibilidad* son:

a) *Disponibilidad de recursos:* entendido como que la factibilidad será mayor en cuanto mayor sea la disponibilidad de recursos para llevar a cabo la alternativa de prevención o control de eutroficación analizada.
b) *Tiempo:* entendido como que la factibilidad se incrementará en cuanto menor sea el tiempo necesario para la ejecución de la alternativa analizada.
c) *Disponibilidad técnica:* entendido como que la factibilidad crecerá entre más grande sea la disponibilidad de técnicas y tecnologías actuales para lograr la ejecución de la alternativa. En este criterio se incluye el grado de calificación y especialización necesario para la mano de obra, así como el nivel de instrucción y experiencia necesarios en el personal técnico encargado de la ejecución de la alternativa analizada (es decir, también se incluye la disponibilidad de personal técnico y mano de obra calificada).

Una vez que se hayan acordado los criterios de ponderación, el siguiente paso es definir en forma consensuada los valores de los factores de ponderación llamados p y π, los cuales corresponden a los criterios de ponderación de las variables de *impacto benéfico* y de *factibilidad*, respectivamente. Los valores de los factores deben expresarse ente cero y uno, pues estos valores suelen asociarse mentalmente con facilidad con *porcentajes*. Para cada variable de decisión, la sumatoria de sus factores de ponderación debe equivaler a la unidad, independientemente del número de criterios de ponderación identificados.

Para fines de demostración de la metodología, a continuación, las Tablas E.1. y E.2. contienen los valores de p y π recomendados de acuerdo al discernimiento del autor. Desde luego, las sesiones de trabajo grupal con las partes interesadas pueden aportar distintos valores para los factores de ponderación, o incluso añadir o retirar criterios de ponderación.

Tabla E.1. Factores Propuestos de Ponderación de *Impacto Benéfico*.

Ponderación según Impacto Benéfico				
Ambiental / Salud	**Económico**	**Político**	**Social**	Σp_i
0.3	0.4	0.1	0.2	1

Para el caso de la determinación de los valores de p y π en las sesiones de trabajo, se recomienda utilizar algún método para que cada participante aporte anónimamente su valor personal de cada factor. Después, se recomienda el cálculo de un valor único para cada factor mediante el empleo de promedios geométricos para reducir el impacto de valores extremos sin necesidad de desecharlos.

Tabla E.2. Factores Propuestos de Ponderación de *Factibilidad*.

Ponderación según Factibilidad			
Disponibilidad de recursos	**Tiempo**	**Disponibilidad técnica**	$\Sigma \pi_i$
0.3	0.2	0.5	1

El siguiente paso de acuerdo a la metodología propuesta, es la asignación de coeficientes con un valor estimado entre 0 y 10, para evaluar a cada alternativa con respecto a ambos tipos de variables de decisión según los criterios de ponderación previamente acordados en sesiones de trabajo anteriores. En este caso, la asignación de una escala del 0 al 10 se recomienda dado que es fácil asociarla con una *calificación* a otorgar a la alternativa analizada. Por razones de nomenclatura, se emplearon las letras c y κ para los coeficientes de las variables de *impacto benéfico* y de *factibilidad*, respectivamente. Al igual que en el caso de los factores de ponderación, para los coeficientes de las variables de decisión es recomendado el uso de algún método para que cada participante proporcione su valor personal de cada coeficiente en forma anónima. Asimismo, se recomienda nuevamente la determinación de un valor único para cada coeficiente a través del cálculo de promedios geométricos para reducir el impacto de los posibles valores extremos sin que sea necesario deshacerse de ellos.

Para fines de ejemplificación de la metodología, a continuación, las Tablas E.3. y E.4. contienen los valores de c y κ propuestos de acuerdo al juicio del autor, con base en la información disponible en la literatura con respecto a las

diversas técnicas de prevención y control de la eutroficación (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989, y González, A.,1996).

Tabla E.3. Ejemplo de los Coeficientes de Valor de la Variable de Decisión *Impacto Benéfico* para las Alternativas Técnicas Analizadas.

k	Alternativa	Coeficientes de Impacto Benéfico, *p*			
		Ambiental / Salud	Económico	Político	Social
1	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	10	6	8	8
2	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	8	10	8	8
3	Control en los usos del suelo de la cuenca.	10	7	8	4
4	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	10	4	10	10
5	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	9	5	10	10
6	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	8	7	10	8
7	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	8	9	8	8
8	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	6	7	10	10
9	Construcción de trincheras de escurrimiento.	9	9	7	7
10	Inactivación de nutrientes en el lago.	10	3	9	10
11	Incremento en los flujos de salida del lago.	8	8	9	5
12	Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).	10	2	9	10
13	Circulación forzada del agua del lago.	9	3	7	6
14	Remoción selectiva de agua del hipolimnion.	8	4	7	8
15	Disminución del nivel en el lago.	5	7	6	6
16	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	9	5	8	8
17	Dragado de sedimentos.	6	7	9	8
18	Cosecha de plantas y algas en el lago.	10	7	9	8
19	Control biológico de algas.	10	5	10	9
20	Control químico de algas.	9	6	9	8
21	Trituración de lirio y/o tule.	4	8	9	7

Una vez que se hubieron determinado los promedios geométricos de las aportaciones de cada participante en cuanto a factores de ponderación y coeficientes de valor, es necesario trabajar con los datos para dar pie a la toma de decisiones. Para ello, se definieron tres índices: el índice de impacto benéfico I_{IB}, el índice de factibilidad I_F, y el índice de viabilidad I_V, cuyas formulaciones de describen a continuación:

De esta forma, un primer paso en la evaluación de las alternativas consistió en calcular un valor del índice de impacto benéfico I_{IB} de acuerdo con:

$$I_{IB,k} \equiv \frac{\sum_i (cp)_i}{10} \qquad \text{(E.1)}$$

donde $I_{IB,k}$ es el índice de impacto para la alternativa analizada k, c_i es el valor asignado (entre 0 y 10) al coeficiente de la alternativa estudiada para el *i-ésimo* criterio de ponderación, y p_i es el factor de ponderación del *i-ésimo* criterio de ponderación (cuyo valor va entre 0 y 1).

Tabla E.4. Ejemplo de los Coeficientes de Valor de la Variable de Decisión *Factibilidad* para las Alternativas Técnicas Analizadas.

k	Alternativa	Coeficientes de Factibilidad, π		
		Disponibilidad de recursos	Tiempo	Disponibilidad Técnica
1	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	7	6	7
2	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	9	7	8
3	Control en los usos del suelo de la cuenca.	9	5	9
4	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	6	4	9
5	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	7	5	9
6	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	8	6	10
7	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	8	9	10
8	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	8	7	10
9	Construcción de trincheras de escurrimiento.	10	6	10
10	Inactivación de nutrientes en el lago.	5	5	7
11	Incremento en los flujos de salida del lago.	10	8	8
12	Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).	3	4	9
13	Circulación forzada del agua del lago.	4	5	8
14	Remoción selectiva de agua del hipolimnion.	3	6	7
15	Disminución del nivel en el lago.	8	8	8
16	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	6	7	9
17	Dragado de sedimentos.	9	6	10
18	Cosecha de plantas y algas en el lago.	8	5	10
19	Control biológico de algas.	7	4	5
20	Control químico de algas.	8	7	8
21	Trituración de lirio y/o tule.	10	5	10

Análogamente, el siguiente paso en la forma de evaluación consistió en calcular un valor del índice de impacto I_F según se indica:

$$I_{F,k} \equiv \frac{\sum_j (\kappa\pi)_j}{10} \qquad \text{(E.2)}$$

donde $I_{F,k}$ es el índice de impacto para la alternativa analizada k, κ_i es el valor asignado (entre 0 y 10) al coeficiente de la alternativa estudiada para el *j-ésimo* criterio de ponderación, y π_i es el factor de ponderación del *j-ésimo* criterio de ponderación (cuyo valor va entre 0 y 1).

En las Ecuaciones (E.1) y (E.2), los productos $(cp)_i$ y $(\kappa\pi)_j$ son denominados los *productos ponderados* de I_{IB} y de I_F, respectivamente. El cálculo de los índices anteriores, junto con sus productos ponderados se muestran en las Tablas E.5. y E.6.

Nótese que las Ecuaciones (E.1) y (E.2) indican que es necesario dividir las sumatorias de los productos ponderados entre diez, para expresar el valor de sus índices respectivos en una escala desde el 0 hasta el 1.

Tabla E.5. Cálculo del Índice de *Impacto Benéfico* a partir de sus Productos Ponderados.

k	Alternativa	Productos Ponderados de Impacto Benéfico				Índice I_{IB}
		Ambiental / Salud	Económico	Político	Social	
1	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	3.00	2.40	0.80	1.60	0.78
2	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	2.40	4.00	0.80	1.60	0.88
3	Control en los usos del suelo de la cuenca.	3.00	2.80	0.80	0.80	0.74
4	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	3.00	1.60	1.00	2.00	0.76
5	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	2.70	2.00	1.00	2.00	0.77
6	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	2.40	2.80	1.00	1.60	0.78
7	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de	2.40	3.60	0.80	1.60	0.84
8	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	1.80	2.80	1.00	2.00	0.76
9	Construcción de trincheras de escurrimiento.	2.70	3.60	0.70	1.40	0.84
10	Inactivación de nutrientes en el lago.	3.00	1.20	0.90	2.00	0.71
11	Incremento en los flujos de salida del lago.	2.40	3.20	0.90	1.00	0.75
12	Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).	3.00	0.80	0.90	2.00	0.67
13	Circulación forzada del agua del lago.	2.70	1.20	0.70	1.20	0.58
14	Remoción selectiva de agua del hipolimnion.	2.40	1.60	0.70	1.60	0.63
15	Disminución del nivel en el lago.	1.50	2.80	0.60	1.20	0.61
16	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	2.70	2.00	0.80	1.60	0.71
17	Dragado de sedimentos.	1.80	2.80	0.90	1.60	0.71
18	Cosecha de plantas y algas en el lago.	3.00	2.80	0.90	1.60	0.83
19	Control biológico de algas.	3.00	2.00	1.00	1.80	0.78
20	Control químico de algas.	2.70	2.40	0.90	1.60	0.76
21	Trituración de lirio y/o tule.	1.20	3.20	0.90	1.40	0.67

Se hace hincapié nuevamente en que los coeficientes de valor mostrados en las Tablas E.3. y E.4. se han incluido sólo con fines de demostración de la metodología a partir de un ejemplo con valores numéricos, pero los valores guardan estrecha relación con las características, ventajas y desventajas encontradas en la literatura de las diversas técnicas de prevención y control de la eutroficación en cuerpos de agua, tales como lagos y presas para el caso de latitudes tropicales (Ryding, S.-O. & Rast, W., 1989, y González, A.,1996). Por lo tanto, los resultados obtenidos en esta demostración (véanse las Tablas E.5. a

E.8.) se aceptaron como una primera aproximación a la recomendación de estrategias de control a seguir en lagos dentro del territorio nacional.

Finalmente, el valor del índice de viabilidad se definió como el producto de los índices anteriores:

$$I_{V,k} \equiv \prod_k (I)_k \tag{E.3}$$

$$I_{V,k} = (I_{IB} \cdot I_F)_k \tag{E.4}$$

donde I_V es el índice de viabilidad, y el subíndice k denota la alternativa analizada en cada caso.

Tabla E.6. Cálculo del Índice de *Factibilidad* a partir de sus Productos Ponderados.

k	Alternativa	Productos Ponderados de Factibilidad			Índice I_F
		Disponibilidad de recursos	Tiempo	Disponibilidad Técnica	
1	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	2.10	1.20	3.50	0.68
2	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	2.70	1.40	4.00	0.81
3	Control en los usos del suelo de la cuenca.	2.70	1.00	4.50	0.82
4	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	1.80	0.80	4.50	0.71
5	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	2.10	1.00	4.50	0.76
6	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	2.40	1.20	5.00	0.86
7	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	2.40	1.80	5.00	0.92
8	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	2.40	1.40	5.00	0.88
9	Construcción de trincheras de escurrimiento.	3.00	1.20	5.00	0.92
10	Inactivación de nutrientes en el lago.	1.50	1.00	3.50	0.60
11	Incremento en los flujos de salida del lago.	3.00	1.60	4.00	0.86
12	Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).	0.90	0.80	4.50	0.62
13	Circulación forzada del agua del lago.	1.20	1.00	4.00	0.62
14	Remoción selectiva de agua del hipolimnion.	0.90	1.20	3.50	0.56
15	Disminución del nivel en el lago.	2.40	1.60	4.00	0.80
16	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	1.80	1.40	4.50	0.77
17	Dragado de sedimentos.	2.70	1.20	5.00	0.89
18	Cosecha de plantas y algas en el lago.	2.40	1.00	5.00	0.84
19	Control biológico de algas.	2.10	0.80	2.50	0.54
20	Control químico de algas.	2.40	1.40	4.00	0.78
21	Trituración de lirio y/o tule.	3.00	1.00	5.00	0.90

La alternativa se consideró como viable sólo si $I_V \geqslant 0.5$, donde los valores de I_V pueden ir desde cero hasta la unidad, y representa la combinación de los índices de impacto y factibilidad. Por lo tanto, en el proceso de toma de decisiones, sólo se recomienda considerar aquellas alternativas viables (es decir, con un índice de viabilidad mayor o igual a 0.5) para incluirlas en un plan estratégico de prevención y control de eutroficación del cuerpo de agua (véase la Tabla E.7.).

Tabla E.7. Toma de Decisiones en cuanto a las Alternativas de Prevención y Control de la Eutroficación según su Viabilidad.

k	Alternativa	Índices		Viabilidad I_V	¿Se decide considerarla en la estrategia contra la eutroficación?
		I_{IB}	I_F		
1	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	0.78	0.68	0.53	Sí
2	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	0.88	0.81	0.71	Sí
3	Control en los usos del suelo de la cuenca.	0.74	0.82	0.61	Sí
4	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	0.76	0.71	0.54	Sí
5	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	0.77	0.76	0.59	Sí
6	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	0.78	0.86	0.67	Sí
7	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	0.84	0.92	0.77	Sí
8	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	0.76	0.88	0.67	Sí
9	Construcción de trincheras de escurrimiento.	0.84	0.92	0.77	Sí
10	Inactivación de nutrientes en el lago.	0.71	0.60	0.43	No
11	Incremento en los flujos de salida del lago.	0.75	0.86	0.65	Sí
12	Aeración del hipolimnion (estrato inferior del lago, próximo al fondo).	0.67	0.62	0.42	No
13	Circulación forzada del agua del lago.	0.58	0.62	0.36	No
14	Remoción selectiva de agua del hipolimnion.	0.63	0.56	0.35	No
15	Disminución del nivel en el lago.	0.61	0.80	0.49	No
16	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	0.71	0.77	0.55	Sí
17	Dragado de sedimentos.	0.71	0.89	0.63	Sí
18	Cosecha de plantas y algas en el lago.	0.83	0.84	0.70	Sí
19	Control biológico de algas.	0.78	0.54	0.42	No
20	Control químico de algas.	0.76	0.78	0.59	Sí
21	Trituración de lirio y/o tule.	0.67	0.90	0.60	Sí

Finalmente, es conveniente ordenar de mayor a menor las alternativas consideradas como viables en función de su índice de viabilidad, a fin de asignar prioridades a las alternativas selectas para considerar su inclusión dentro del diseño de una estrategia integral de prevención y control de la eutroficación para cuerpos de agua.

En la siguiente página, la Tabla E.8. presenta la asignación de prioridades a las alternativas consideradas de prevención y control de la eutroficación en cuerpos de agua.

Tabla E.8. Prioridades para las Alternativas de Prevención y Control de la Eutroficación en Función de su Viabilidad.

k	Alternativa	Índices		Viabilidad I_V
		I_{IB}	I_F	
1	Filtración del agua de corrientes tributarias a través de filtros de óxido de aluminio.	0.84	0.92	0.77
2	Construcción de trincheras de escurrimiento.	0.84	0.92	0.77
3	Restricción en el uso de detergentes fosfatados en la cuenca.	0.88	0.81	0.71
4	Cosecha de plantas y algas en el lago.	0.83	0.84	0.70
5	Adición directa de químicos precipitadores de fósforo a las aguas de las corrientes tributarias.	0.78	0.86	0.67
6	Canalización y derivación de aguas negras y residuales.	0.76	0.88	0.67
7	Incremento en los flujos de salida del lago.	0.75	0.86	0.65
8	Dragado de sedimentos.	0.71	0.89	0.63
9	Control en los usos del suelo de la cuenca.	0.74	0.82	0.61
10	Trituración de lirio y/o tule.	0.67	0.90	0.60
11	Control químico de algas.	0.76	0.78	0.59
12	Tratamiento fisicoquímico de corrientes tributarias.	0.77	0.76	0.59
13	Cobertura física de sedimentos en el fondo del lago.	0.71	0.77	0.55
14	Tratamiento de corrientes tributarias en presas colocadas antes de su incorporación al lago.	0.76	0.71	0.54
15	Eliminación de fosfatos mediante precipitación química durante el tratamiento de aguas previo a su descarga en corrientes tributarias al lago.	0.78	0.68	0.53

ANEXO F. GRÁFICAS DE LAS REGRESIONES POLINOMIALES DE LAS VARIABLES GEOMÉTRICAS DEL LAGO DE ZAPOTLÁN

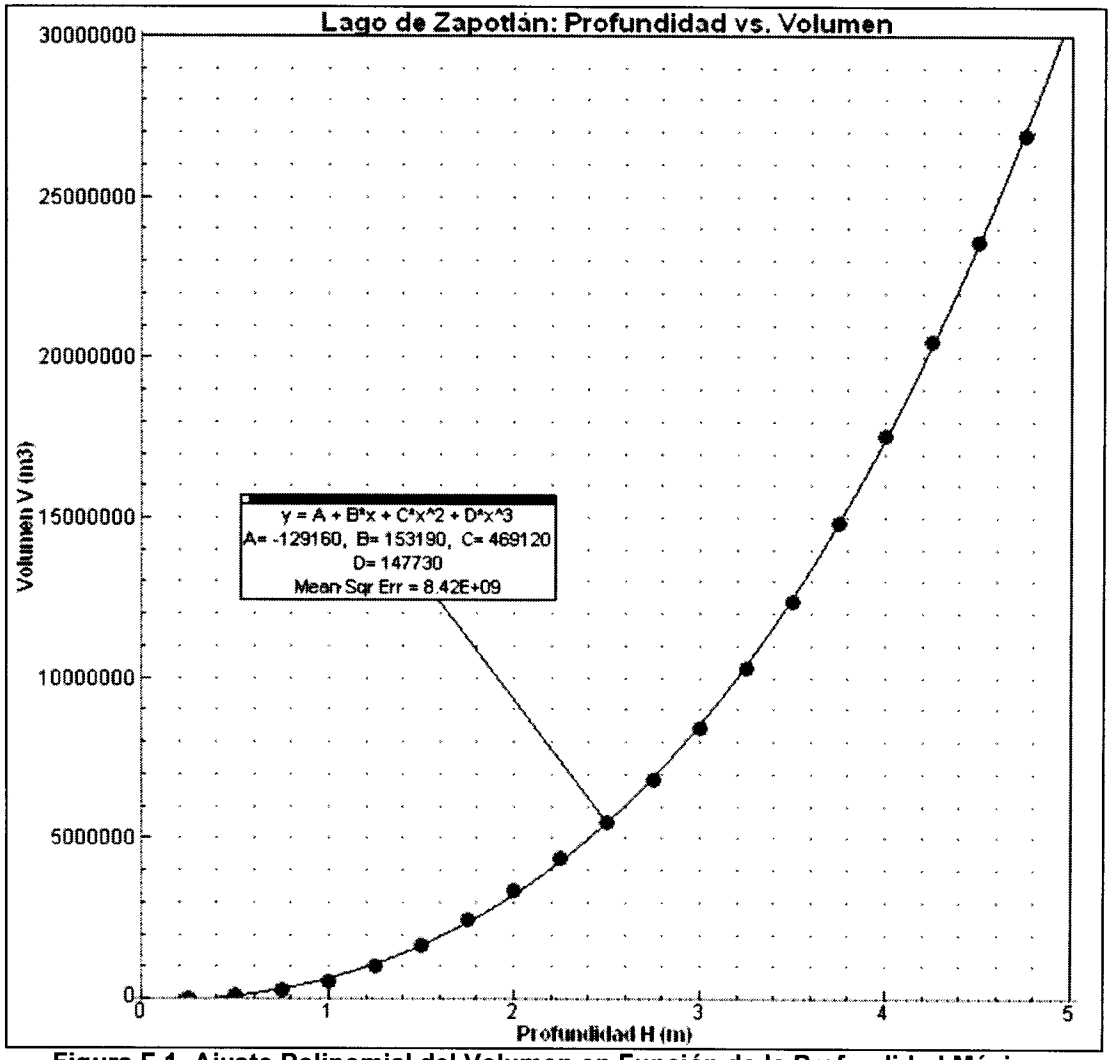

Figura F.1. Ajuste Polinomial del Volumen en Función de la Profundidad Máxima.

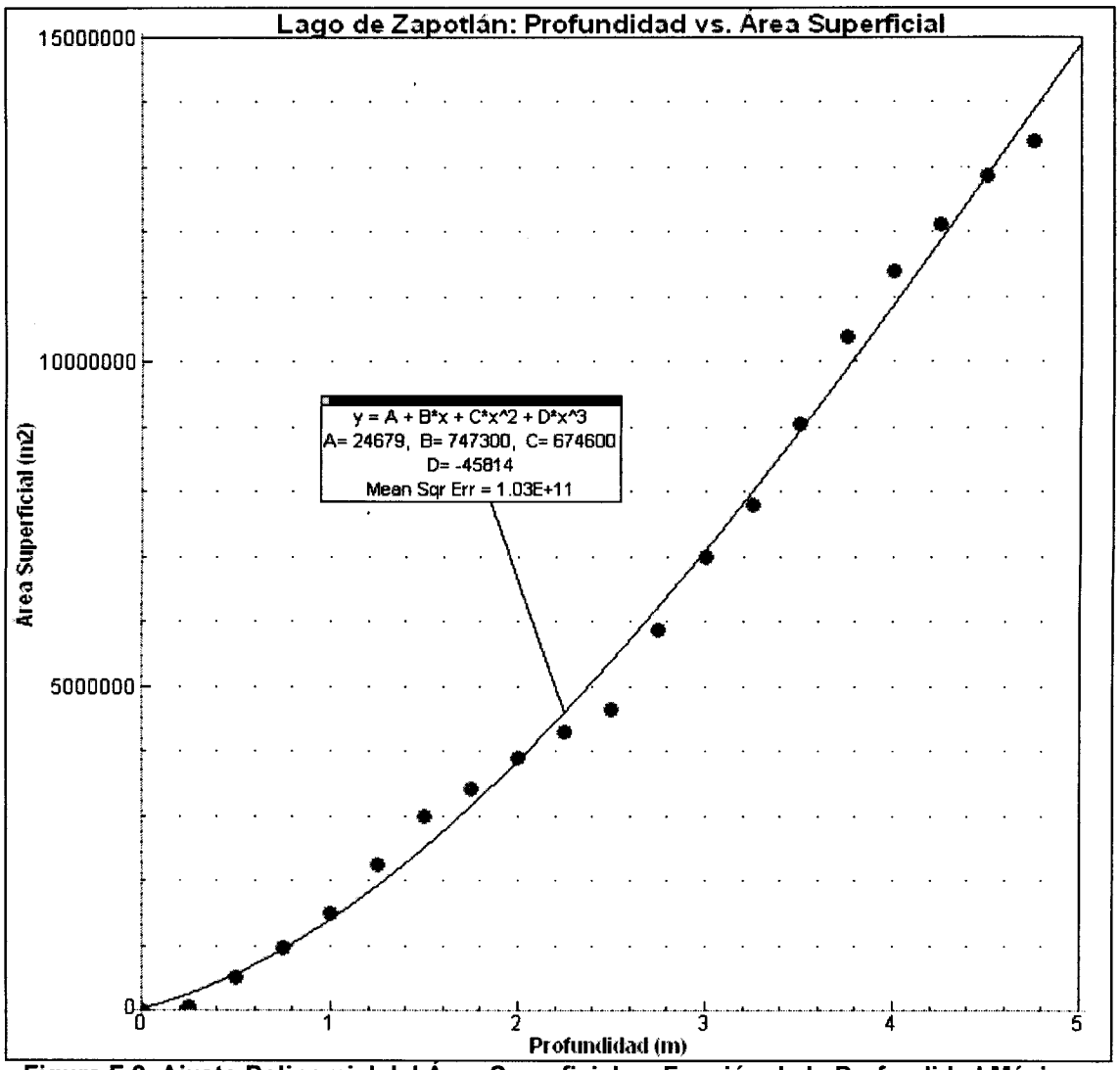

Figura F.2. Ajuste Polinomial del Área Superficial en Función de la Profundidad Máxima.

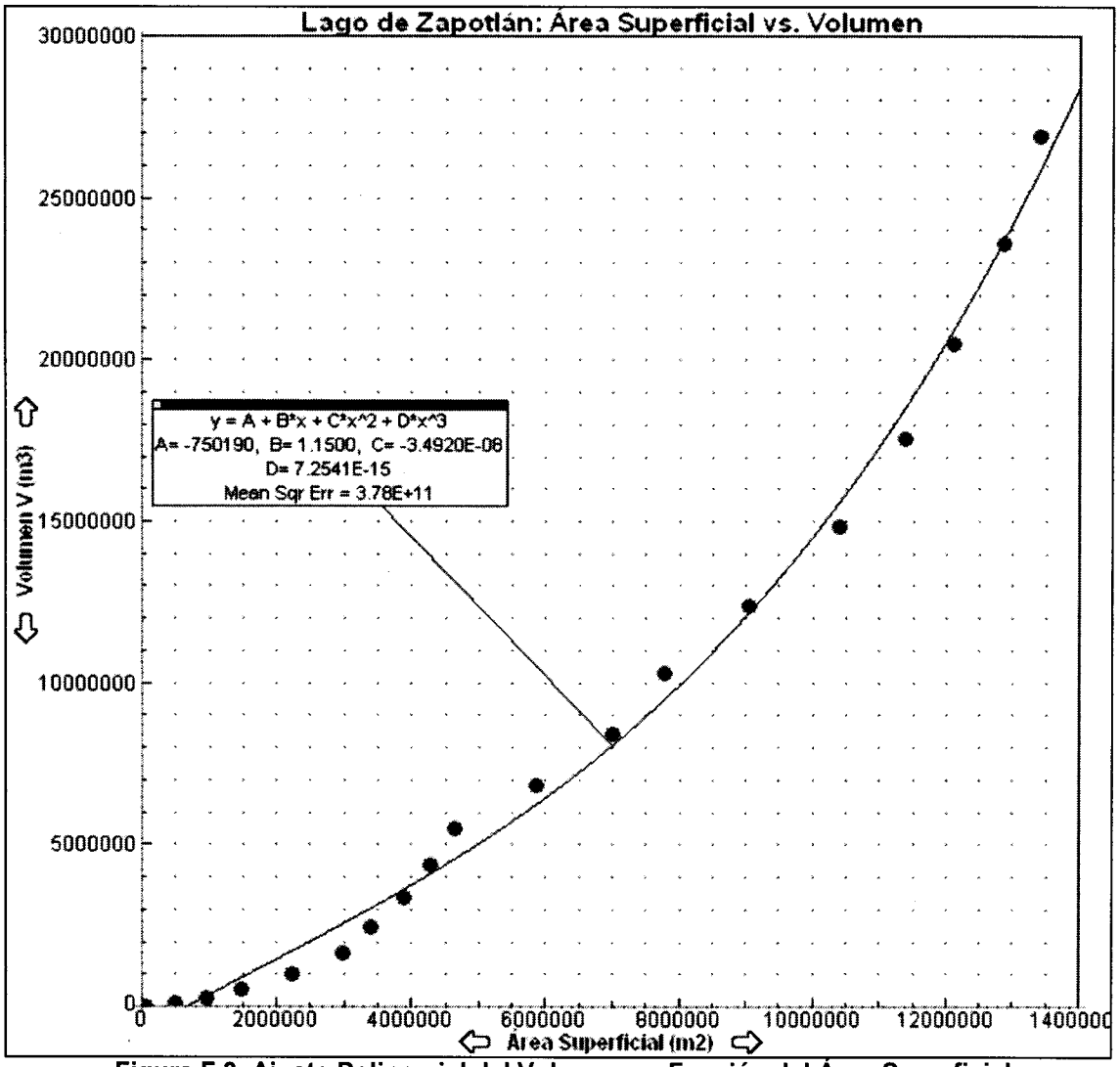

Figura F.3. Ajuste Polinomial del Volumen en Función del Área Superficial.

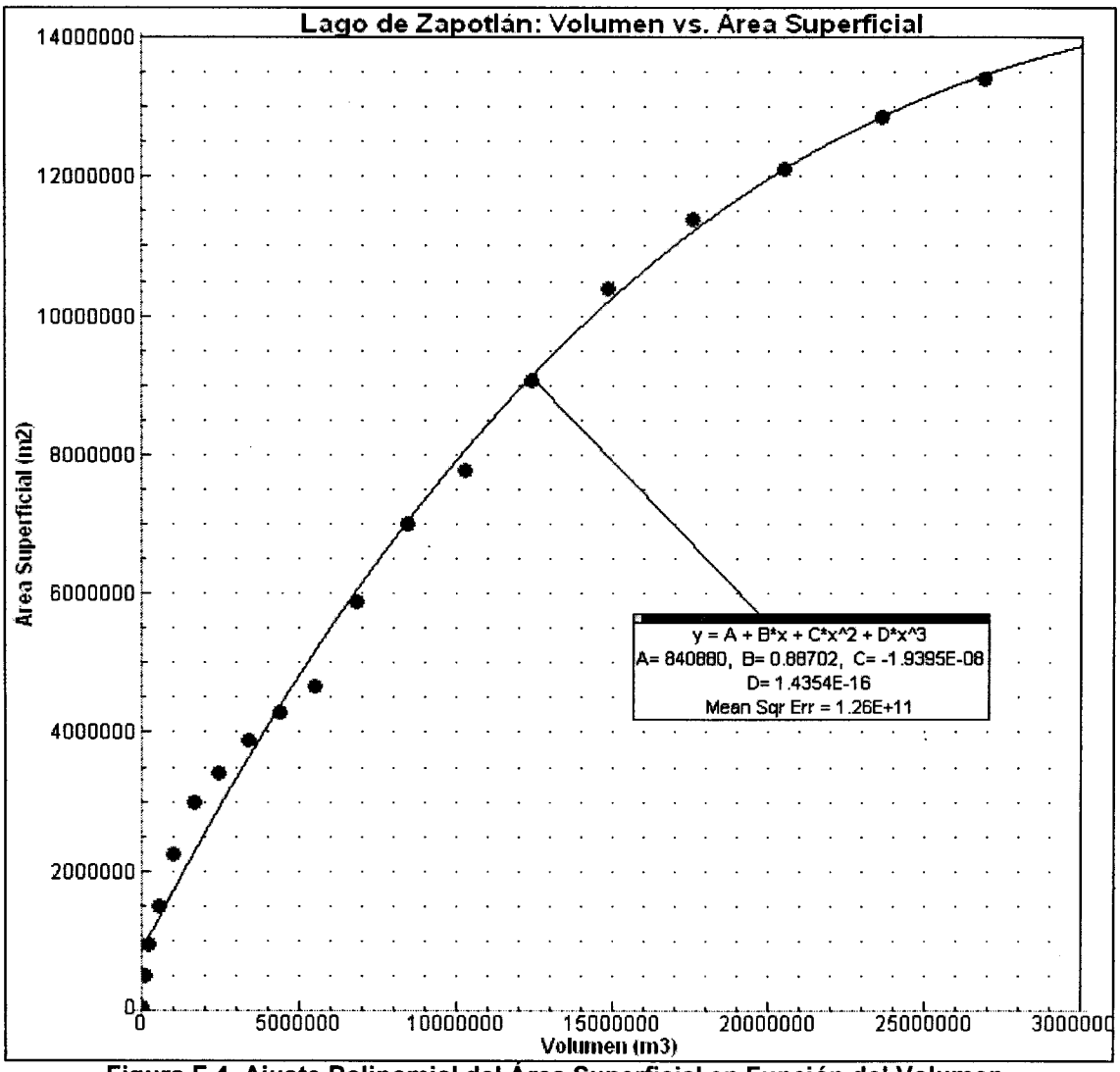

Figura F.4. Ajuste Polinomial del Área Superficial en Función del Volumen.

ANEXO G. DATOS USADOS EN EL ESCENARIO DE SOLUCIÓN DEL MODELO DE EUTROFICACIÓN

Tabla G.1. Datos Específicos para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación.

Concepto	Notación	Unidades	Valor	Referencia o comentario
Temperatura media anual del agua.	T	°C	26.06	Tabla 4.14.
Volumen del lago.	V	m^3	23,312,283	Tabla 4.5.
Profundidad media del lago.	V/A_{sup}	m	1.87	Tabla 4.5.
Área superficial.	A	ha	1226.32	Tabla 4.5.
Latitud media del lago.	ϕ	°	19.74	de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F.A. et al. (2003).
Concentración de Clorofila *a*.	$[Chl\,a]$	µg/L	88	Evaluación Limnológica y Biología Pesquera de la Laguna de Zapotlán, Jalisco(conferencia) (2002).
Concentración de PO_4-P.	$[P]$	mg/m^3	613	Tabla 4.14
Concentración de NH_4-N.	$[N_1]$	mg/m^3	1170	Tabla 4.14
Concentración de NO_3-N.	$[N_2]$	mg/m^3	30	Tabla 4.14

Tabla G.2. Datos Calculados para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación.

Concepto	Notación	Unidades	Valor	Referencia o comentario
Profundidad del disco Secchi.	SD	m	0.76	Ecuación (3.48)
Coeficiente de extinción de la luz.	k_e	m^{-1}	2.48	Ecuación (3.47)
Función de carga orgánica de PO_4-P de entrada al volumen de control.	$W_P(t)$	mg/d	215	Crites, R.W. & Tchobanoglous, G. (1998). p. 180. Se consideró una población de 105,000hab en la cuenca y un factor de producción de 2.05g/d per capita.
Función de carga orgánica de NH_4-N de entrada al volumen de control.	$W_{N1}(t)$	mg/d	819	Crites, R.W. & Tchobanoglous, G. (1998). p. 180. Se consideró una población de 105,000hab en la cuenca y un factor de producción de 7.8g/d per capita.
Función de carga orgánica de NO_3-N de entrada al volumen de control.	$W_{N2}(t)$	mg/d	5792	Crites, R.W. & Tchobanoglous, G. (1998). p. 180. Se consideró una población de 105,000hab en la cuenca y un factor de producción de 5.5g/d per capita.

Tabla G.3. Datos Típicos Disponibles en la Literatura para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación.

Concepto	Notación	Unidades	Valor	Referencia o comentario
Intensidad óptima de la luz en el volumen de control para el desarrollo de fitoplancton.	I_s	ly/d	300	Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). p. 424.
Tasa máxima de crecimiento de fitoplancton.	$\mu_{máx}$	d^{-1}	1.8	Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). p. 428.
Razón de ([N_1]+ [N_2]):biomasa (fracción masa).	a_N	—	10	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Razón de [P]:biomasa (fracción masa).	a_P	—	1.0	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Constante cinética de hidrólisis o mineralización.	k_0	d^{-1}	0.1	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Factor cinético de corrección de temperatura para la constante de mineralización.	θ_0	—	1.08	Chapra, S.C. (1997). p. 639.
Factor cinético de corrección de temperatura para la constante de nitrificación.	θ_N	—	1.103	Crites, R.W. & Tchobanoglous, G. (1998). p. 438.
Factor cinético de corrección de temperatura para la constante de decaimiento endógeno y tasa de mortalidad de fitoplancton.	θ_e	—	1.08	Chapra, S.C. (1997). p. 639.
Factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de crecimiento de fitoplancton.	θ_b	—	1.066	Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). p. 419.
Factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de mortalidad de zooplancton.	θ_d	—	1.08	Chapra, S.C. (1997). p. 639.
Factor cinético de corrección de temperatura para la tasa de depredación de fitoplancton por el zooplancton.	θ_z	—	1.08	Chapra, S.C. (1997). p. 639.
Fracción masa de [P] en los detritos.	f_P	—	0.03	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Fracción masa de ([N_1]+ [N_2]) en los detritos.	f_N	—	0.03	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Constante cinética de nitrificación.	k_N	d^{-1}	0.9	Crites, R.W. & Tchobanoglous, G. (1998). p. 439.
Constante de decaimiento endógeno y tasa de mortalidad de fitoplancton.	r_e	d^{-1}	0.1	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Velocidad de sedimentación del fitoplancton.	v_s	m/d	0.2	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Tasa de depredación de fitoplancton por el zooplancton.	g_1	$m^3/(d*mg)$	0.0004	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Tasa aparente de sedimentación de detritos orgánicos.	k_s	m/d	0.1	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Tasa de mortalidad de zooplancton.	d	d^{-1}	0.07	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Constante media de saturación de [Si].	Ksi	mg/m^3	75	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Constante media de saturación de [P].	K_P	mg/m^3	10	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.
Constante media de saturación de ([N_1]+ [N_2]).	K_N	mg/m^3	10	Schnoor, J.L. (1996). p. 211.

Tabla G.4. Datos Estimados para para el Lago de Zapotlán en el Modelo de Eutroficación.

Concepto	Notación	Unidades	Valor	Referencia o comentario
Biomasa (base seca) de fitoplancton.	B	mg/m^3	4520	Estimación.
Concentración de detritos orgánicos(base seca).	D	mg/m^3	400	Estimación.
Biomasa (base seca) de zooplancton.	Z	mg/m^3	950	Estimación.
Biomasa (base seca) de peces pequeños.	F_1	mg/m^3	2800	Estimación.
Biomasa (base seca) de peces grandes.	F_2	mg/m^3	900	Estimación.
Tasa de depredación de fitoplancton por peces pequeños.	g_2	$m^3/(d*mg)$	0.00002	Estimación.
Tasa de depredación de zooplancton por peces pequeños.	g_3	$m^3/(d*mg)$	0.003	Estimación.
Tasa de depredación de fitoplancton por peces grandes.	g_4	$m^3/(d*mg)$	0.000005	Estimación.
Tasa de depredación de peces pequeños por peces grandes.	g_5	$m^3/(d*mg)$	0.0009	Estimación.
Tasa de mortalidad de peces pequeños.	k_{d1}	d^{-1}	0.0005	Estimación.
Tasa de mortalidad de peces grandes.	k_{d2}	d^{-1}	0.004	Estimación.
h: tasa de pesca de peces grandes, T^{-1}.	h	d^{-1}	0.09	Estimación.

REFERENCIAS Y FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

Asante-Duah, K. (1993). *Hazardous Waste Risk Assessment.* EUA: Lewis Publishers.

Baird, D. C. (1991). *Experimentación: Una Introducción a la Teoría de Mediciones y al Diseño de Experimentos* (2ª ed.). México: Prentice Hall.

Blyth, F. G. H. & de Freitas, M. H. (1989). *Geología para Ingenieros.* México: CECSA.

Burden, R. L & Faires, J. D. (1998). *Análisis Numérico* (6ª ed.). México: ITP.

Carta de Efectos Climáticos Regionales Mayo-Octubre Colima E13-3 Escala 1:250,000 (1991). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI].

Carta de Efectos Climáticos Regionales Noviembre-Abril Colima E13-3 Escala 1:250,000 (1991). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI].

Carta Edafológica Sayula E13B15 Escala 1:50,000 (1976). México: Comisión de Estudios del Territorio Nacional [CETENAL].

Carta Topográfica Ciudad Guzmán E13B25 Escala 1:50,000 (2ª ed.) (1992). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI].

Carta Topográfica Sayula E13B15 Escala 1:50,000 (1973). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI].

Carta de Uso del Suelo Sayula E13B15 Escala 1:50,000 (1976). México: Comisión de Estudios del Territorio Nacional [CETENAL].

Chapra, S. C. (1997). *Surface Water Quality Modeling.* EUA: McGraw-Hill.

Cibrián, E. (1980). *La Lucha de Zapotlán por el Agua.* México: Vera.

Crites, R. W. & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems.* EUA: McGraw-Hill.

de Anda, J. (2003). *Impedimentos para el Desarrollo de un Plan Sustentable para el Lago de Zapotlán (Restricciones Ecológicas)* (conferencia). México: CIATEJ.

de Anda, J. (2001). *Contaminación por Fósforo en el Lago de Chapala.* Tesis para recibir el grado de Doctor en Ciencias en el posgrado de Ciencias de la Tierra. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

de Anda, J., Quiñones-Cisneros, S. E., French, R. & Guzmán, M. (1998). Hydrologic Balance of Lake Chapala (Mexico). *Journal of the American Water Resources Association, 34*(6), 1319-1331.

de Anda, J., Shear, H., Aivazian, V, Feria, A., Guzmán, M, González, F. A. et al. (2003). *Assessment of Biological Integrity of Lake Zapotlán (Mexico) and its Influence in Local Human Health* (documento). Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., Universidad de Guadalajara, University of Toronto, Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (Jalisco). 6 pp.

de Anda, J., Shear, H., Maniak, U. & Riedel, G. (2000). Phosphorous Balance in Lake Chapala (Mexico). *Journal of Great Lakes Research, 26*(2), 129-140.

El Informador, Diario Independiente (2002). *Evaluación de la Gestión de Gobierno. Municipio de Zapotlán.* Última consulta: 11 de mayo de 2003, desde:
http://www.informador.com.mx/informa/depa/pulsosite/Zapotlán.htm.

Evaluación Limnológica y Biología Pesquera de la Laguna de Zapotlán, Jalisco (conferencia) (2002). México: Universidad de Guadalajara (Centro Universitario del Sur [CUSUR]) y SAGARPA.

Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology* (4a ed.). EUA: Prentice Hall.

Fitch, R. K. (2002). *WinSTAT® for Excel. User's Manual.* EUA: R. Fitch Software.

Fogler, H . S. (1999). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (3ª ed.). EUA: Prentice Hall.

García de Alba, R. (1988). *Micro-Regionalización Sísmica del Valle de Zapotlán, Jalisco.* Tesis de grado para obtener el título de Licenciado en Geografía. México: Universidad de Guadalajara.

Grant, D. M. (1995). *Open Channel Flow Measurements Handbook* (3ª ed.). EUA: ISCO.

González, A. (1996). *Control del Lirio Acuático en Cuerpos de Agua.* México: Secretaría de Desarrollo Rural [SEDER]. Gobierno del Estado de Jalisco.

Guzmán, M. (1997). *Bioindicadores* (documento). Chapala, Jalisco, México: Instituto de Limnología, Universidad de Guadalajara.

Guzmán, M. (1996). *El Recurso Natural Agua* (documento). Chapala, Jalisco, México: Instituto de Limnología, Universidad de Guadalajara.

Hemond, H. F. & Fechner, E. J. (1994). *Chemical Fate and Transport in the Environment.* EUA: Academic Press.

Hermosillo, J. J., Gudiño, D. & Mendoza, M. (1995). *Notas sobre el Curso de Energía Solar.* México: Universidad ITESO.

Jiménez, B. E. (2001). *La Contaminación Ambiental en México.* México: Limusa Noriega.

Korte, G. B. (2001). *The GIS Book* (5ª ed.). EUA: OnWord Press.

Manahan, S. E. (1994). *Environmental Chemistry* (6ª ed.). EUA: CRC Press.

Maniak, U. (2004). *Decision Support System for Lake Zapotlán: Project Management* (documento final del Curso sobre Problemas de Eutroficación y Restauración de Lagos y Embalses). México: CIATEJ.

McGhee, T. J. (1999). *Abastecimiento de Agua y Alcantarillado: Ingeniería Ambiental* (6ª ed.). Colombia: McGraw-Hill.

Metcalf & Eddy, Inc. (1991). *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse* (3ª ed.). EUA: McGraw-Hill.

Monmonier, M. S. (1996). *How to Lie with Maps* (2ª ed.). EUA: The University of Chicago Press.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de1997.

Plan Parcial para el Desarrollo Integral de la Zona de la Laguna (2002). CD-ROM. México: Universidad de Guadalajara, H. Ayuntamiento Constitucional de Zapotlán el Grande, Jalisco, H. Ayuntamiento Constitucional de Gómez Farías, Jalisco.

Plan Maestro de la Laguna de Zapotlán (2003). CD-ROM. México: Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (Jalisco).

Programa Ambiental de las Naciones Unidas [UNEP] (1994). *The Pollution of Lakes and Reservoirs*. Kenya: UNEP Environment Library.

RAISON™ for Windows. Version 1.0. User's Guide (1996). Canadá: NWRI (Instituto Nacional de Investigación del Agua).

Rodríguez, J. J. (2000). *Desarrollo de Un Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Datos de Calidad del Agua del Lago de Chapala (México)*. Tesis para recibir el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental. México: Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara.

Romero, J. A. (1999). *Calidad del Agua* (2ª ed.). México: Alfaomega.

Ryding, S.-O. & Rast, W. (1989). *The Control of Eutrophication of Lakes and Reservoirs. (Man and the Bioshpere Series: Vol. I)*. Reino Unido: Parthenon Publishing & UNESCO Paris.

Sawyer, C. N., McCarty, P. L. & Parkin, G. F. (2001). *Química para Ingeniería Ambiental* (4ª ed.). México: McGraw-Hill.

Schnoor, J. L. (1996). *Environmental Modeling. Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil.* EUA: Wiley-Interscience.

Shear, H. (2000). *Some Basic Aspects of Lake Ecology* (conferencia). México: Universidad ITESO, CIATEJ.

Susskind, L., Levy, P. F. & Thomas-Larmer, J. (2000). *Negotiating Environmental Agreements. How to Avoid Escalating Confrontation, Needless Costs and Unnecessary Litigation.* EUA: Island Press.

Thibodeaux, L. J. (1996). *Environmental Chemodynamics. Movement of Chemicals in Air, Water and Soil* (2ª ed.). EUA: Wiley-Interscience.

Thomann, R. V. & Mueller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control.* EUA: Harper Collins.

Twidell, J. & Weir, T. (1986). *Renewable Energy Resources.* Reino Unido: Spon Press.

United States Geological Survey [USGS] (2003). *Geographic Information Systems.* Última consulta: 25 de octubre de 2003, desde: http://erg.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/.

VITA DEL AUTOR

I. INFORMACIÓN PERSONAL

Nombre Completo:	Alejandro D'Urquiza Díaz.
Fecha de Nacimiento:	Diciembre 16 de 1977.
Lugar de Nacimiento:	Guadalajara, Jalisco, México.
Cédula Profesional:	3643959.
RFC:	DDAL771216B53.
CURP:	DXDA771216HJCXZL05.
Dirección Permanente:	Plan de la Soledad # 3409. Fracc. Revolución. Tlaquepaque, Jalisco. C.P. 45580.
Teléfonos:	(33) 3639-5250 (casa), (33) 3905-1375 (celular).
Correo electrónico:	aurkiza@itesm.mx aurkiza@iteso.mx

II. EDUCACIÓN PROFESIONAL

- **Postgrado:** ***Maestría en Ciencias con especialidad en Sistemas Ambientales.*** Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara (2001-2004).
- **Grado:** ***Ingeniería Ambiental, enfocada en Ingeniería de Procesos Químicos.*** Universidad ITESO (Guadalajara, Jalisco). Graduado en la generación 2000 en esta disciplina profesional.

III. EXPERIENCIA LABORAL EN EL CAMPO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Centro de Calidad Ambiental (Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara).

Septiembre 2001 hasta la fecha:

Cargo: Coordinador de Proyectos de Ingeniería Ambiental y Seguridad Industrial.

Puesto: Consultor de Ingeniería Ambiental.

Teléfono: (33) 3669-3000, ext. 3806.

Universidad ITESO: Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales.

Enero 2004 hasta la fecha:

Puesto: Profesor de los siguientes cursos teórico-prácticos:

- *Análisis de Riesgo Ambiental* (para *Ingeniería Ambiental* e *Ingeniería Química).*
- *Ingeniería Ambiental Básica* (para *Ingeniería Industrial*).

Agosto 2000 – diciembre 2000:

Puesto: Profesor de los siguientes cursos de laboratorio:

- *Balances de Materia y Energía.*
- *Transferencia de Calor.*
- *Mecánica de Fluidos.*
- *Calidad del Agua.*

Agosto 1996 – junio 2000:

Puesto: Asistente de Laboratorios de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Química (incluyendo el acondicionamiento de instalaciones, construcción de equipos, la preparación de prácticas de laboratorio y revisiones de seguridad industrial).

IV. OTRAS AFILIACIONES PROFESIONALES

- **Observatorio Metropolitano de Guadalajara (OMEGA):** Consultor Ambiental de Desarrollo Urbano desde febrero de 2004.
- **CEDIGRAF (CCIJ):** Consultor de Productividad y Rentabilidad Ambiental para el sector lechero de Ciudad Guzmán desde agosto de 2003.

- **Cadena Productiva de la Industria Electrónica (CADELEC):** Evaluador Ambiental dentro del *"Proceso de Evaluación y Certificación de Empresas Proveedoras de la Industria de la Electrónica"*, desde mayo de 2003.
- **Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ):** Instructor / facilitador del curso-taller *"Gestión Ambiental Rentable"* (el cual consta de tres módulos llamados *"Uso Eficiente de Materias Primas"*, *"Buenas Prácticas de Gestión Empresarial"* e *"Introducción a la Gestión de Costos con Criterios Ambientales"*) dentro del Proyecto *"Eco-eficiencia en el Sector Privado"*, desde febrero de 2003.
- **Red Mexicana de Manejo Ambiental de Residuos, Jalisco (REMEXMAR Jalisco):** Miembro desde septiembre de 2001.

V. HABILIDADES E INTERESES PROFESIONALES

- Ingeniería Ambiental de Procesos Industriales.
- Modelación de Sistemas Ambientales.
- Transporte y Destino de Contaminantes.
- Análisis de Riesgos Ambientales (por Exposición a Sustancias Tóxicas y por ocurrencia de Eventos en Instalaciones y Operaciones Industriales).
- Estrategias y Operaciones Unitarias de Ingeniería para Minimización, Prevención, Tratamiento, Control y Manejo de Residuos y Descargas Industriales.
- Acondicionamiento de Aguas para Usos Industriales e Ingeniería de Tratamiento de Aguas Residuales.
- Fuentes Alternas de Energía.
- Seguridad e Higiene Industrial.
- Planeación Estratégica Ambiental.
- Reducción y Gestión de Costos Ambientales.