



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

# **T E S I S**

**DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ASIMILACIÓN DE  
CONTAMINANTES EN LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO,  
PUEBLA**

que para obtener el grado de

**Doctor en**

**Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta

**Eric Daniel Gutiérrez López**

**Tutor: Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**

Jiutepec, Morelos

Diciembre de 2014

**A mi madre, Doña Betty**

**A mi padre, Don Asdrúbal**

**A Erika y Daniel**

**Este trabajo está dedicado a los servidores públicos que han dedicado parte de su vida con esfuerzo y dedicación, sacrificando el tiempo con sus familias, a contribuir, desde su trinchera, a lograr la política pública más importante de este país dentro del sector hídrico que es la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua de México.**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la Dra. Gabriela Moeller Chávez, por su dirección y orientación para el desarrollo de esta investigación, su tiempo, experiencia y sugerencias a la estructuración del documento final y revisión. A la Dra. Gabriela Mantilla Morales por sus invaluable consejos y contribuciones a los objetivos alcanzados. Al Dr. Carlos Patiño Gómez por su apoyo y guía para adentrarme a la problemática de la calidad del agua y el cambio climático. A la Dra. Sofía Garrido Hoyos por haber aceptado ser parte del Comité Tutorial, su extensa revisión y comentarios.**

**Al Dr. Felipe I. Arreguín Cortés por impulsar la investigación dentro de la Comisión Nacional del Agua, particularmente la calidad del agua orientada a los aspectos biológicos.**

**Al Ing. Enrique Mejía Maravilla, por transmitirme su experiencia, impulso y apoyo invaluable sin el que no hubiera sido posible concluir este estudio.**

**A mis compañeros y amigos de la Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental, particularmente al Biol. Luis Colón Téllez e Ing. Salvador de Ita Montaño por su apoyo en la edición final del documento; al M. en I. Leopoldo Sánchez Espinoza, por su contribución en la conformación de la base de datos y su análisis; al M. en I. José Alfredo Rojas G. y la I. Q. Ivonne Reyes por su ayuda en la sistematización del modelo matemático utilizado. A la M. en B. Claudia Nava Ramírez por su apoyo y aportaciones a los datos históricos de calidad del agua del área de estudio; a la Biol. Ivonne Cuesta Zarco por el análisis toxicológico realizado y al Biol. Martín Castro por su apoyo junto con toda la Subgerencia en muestreo y al seguimiento de las estaciones automáticas de calidad del agua.**

**A la I. Q. Valia Goytia Leal, a la Q. M. Margarita Lobato Callero y a la Ing. Norma Heiras Rentería por su apoyo en el laboratorio y actividades de campo. A Beatriz Salas por su apoyo administrativo y a la Biol. Araceli Chávez por su gestión dentro del Fondo Sectorial CONAGUA-CONACYT.**

**A la M. en A. Herminia Flores Ocampo por su paciencia y apoyo incondicional.**

**A la Agencia Internacional de Cooperación de Japón (JICA), por su asesoría y parte del financiamiento de esta investigación.**

**A la Comisión Nacional del Agua por las facilidades y apoyo para realizar este estudio y permitirme participar en este posgrado dentro del Fondo de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua, CONAGUA-CONACYT.**

**A todos aquellos que contribuyeron a la culminación de este trabajo.**

## Resumen

La presa Manuel Ávila Camacho ubicada en el estado de Puebla, como muchas presas en el país, se encuentra sometida a fuertes presiones como ser una trampa de sedimentos, lo que abate su capacidad de almacenamiento y reduce su vida útil; es receptora de desechos domésticos e industriales con gran cantidad de nutrientes que acentúan los efectos de la eutroficación. Además, la situación se agrava debido a que muchos de estos residuos son sustancias tóxicas que no sólo deterioran su calidad, sino que afectan a la salud pública y a los servicios ambientales, especialmente a la recreación, al turismo, a la pesca y en general, a la biodiversidad. Ante esta situación, este trabajo desarrolló una metodología simplificada que tiene como propósito el de constituirse como una herramienta aplicable a la rehabilitación de la calidad del agua de este embalse y por ende, de los usos a que se destina.

Esencialmente, la metodología permite calcular la reducción requerida de contaminantes con base en la capacidad intrínseca de los cuerpos de agua para adaptarse a la perturbación. Esta capacidad está asociada a las características de los residuos introducidos al embalse y a las propiedades de este entorno para el abatimiento de las concentraciones de los contaminantes o su transformación en otras sustancias inocuas dentro del propio sistema, lo que es conocido como la capacidad de asimilación o autodepuración. Se presenta el proceso para determinar dicha capacidad que inició con la identificación y selección de contaminantes a partir de la magnitud de su presencia en los tributarios (ríos Atoyac y Alseseca), en el efluente, en los sedimentos, en tejidos de plantas acuáticas y de peces, así como en el propio embalse, relacionado su importancia en la perturbación con indicadores tales como su concentración, distribución, frecuencia de aparición y toxicidad; además, se calcularon las cargas aportadas y extraídas por el efluente. Posteriormente, se adaptaron y aplicaron dos modelos matemáticos simplificados. El primero basado en la ecuación de Thomann y Di Toro (1983) que permitió determinar la capacidad de asimilación del embalse en términos de materia orgánica, sustancias tóxicas y de nutrientes; el segundo (Modelo de Lagos Cálidos del CEPIS), se aplicó para determinar el estado trófico del embalse y la reducción particularmente del fósforo total. Fue posible predecir la concentración esperada en el embalse para diferentes escenarios de reducción de contaminantes en los afluentes, principalmente para alcanzar los valores de referencia recomendados nacionalmente (Criterios Ecológicos de Calidad del Agua) o estándares de calidad del agua de otros países. Otro escenario fue predecir el posible impacto del cambio climático en la calidad del agua del embalse por el incremento de la temperatura y la disminución de la precipitación.

La presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo se identificó como un sistema cálido-tropical, completamente mezclado (polimítico); en condiciones de equilibrio que puede ser representado por valores promedio anual. Los contaminantes convencionales que por su concentración fueron los más importantes en los tributarios y en el embalse correspondieron a los sólidos suspendidos totales, la DBO<sub>5</sub>, DQO, COT; el N-total, N-NH<sub>3</sub>, N-NO<sub>2</sub> y el fósforo total; los sulfuros y detergentes (SAAM). A partir de la relación DBO<sub>5</sub>/DQO, se determinó que el río Atoyac corresponde a agua cruda, sin tratamiento o con tratamiento primario debido a que los valores de la relación variaron entre 0.25 y 0.65. El río Alseseca corresponde totalmente a un agua no tratada por presentar la relación DBO/DQO por arriba de 0.4. De acuerdo a estos valores, la calidad del agua se asocia a descargas del tipo de la industria química y farmacéutica, no obstante, los valores más representativos de la relación, corresponden a los del tipo de la industria textil. La

industria textil representa el 32% de la industria manufacturera aguas arriba de la presa y es el mayor de todos los giros, así mismo, la química y petroquímica representan el 5.7%, por lo que estos resultados son congruentes con los giros industriales preponderantes de la ciudad de Puebla y zona conurbada. El embalse presentó valores entre 0.1 y 0.3 por lo que corresponde a agua proveniente de un efluente tratado biológicamente pero con presencia de tóxicos refractarios. La presa Valsequillo funciona como un gran sistema de tratamiento que mejora la calidad del agua de los tributarios en casi todas las variables cuantificadas. Tales decaimientos están asociados al volumen de almacenamiento, profundidad media, al tiempo de residencia hidráulico, a la extracción de agua y particularmente a la capacidad de remoción de contaminantes del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) ubicado en las entradas del embalse. Esta planta tiene una función de filtro y amortiguamiento de la contaminación. Con base en la aplicación del Modelo de Lagos Cálidos del CEPIS para la determinación de la eutroficación, se corroboró el estado eutrófico del embalse.

En cuanto a los contaminantes no convencionales, las sustancias orgánicas más importantes por su frecuencia de detección, correspondieron a el Bis-2-(Etilhexil) Ftalato, el Dietilftalato, el Dimetilftalato, Isoforona, el Nonilfenol, el Fenantreno y el Naftaleno, el Tetracloroetileno, el 2, 4, 6-Triclorofenol y el 2,4-Diclorofenol. Como sustancia ampliamente distribuida y persistente destacó el Bis-2 (Etilhexil) Ftalato debido a que fue la única que se cuantificó su presencia en los sedimentos, en la biota (peces) y en el agua. En esta última presentó concentraciones superiores al Criterio Ecológico de Calidad del Agua establecido en México como referencia para la protección de la vida acuática. En los tejidos de peces su concentración fue superior de aquellas encontradas en estudios realizados en Estados Unidos de América. En correspondencia con la presencia de estas sustancias, los resultados de la caracterización tóxica obtenida a través de la bacteria *Vibrio fischeri*, mostraron que está presente toxicidad aguda alta y permanente en el río Atoyac y Alseseca, así como en la zona profunda de la presa y moderada en el efluente.

A partir de la información y de la aplicación del modelo se determinó la capacidad de asimilación de la presa y los Límites Máximos de Descarga (LMD) para metas específicas de calidad del agua (umbrales críticos). La presa tiene capacidad de asimilación, es decir carga disponible, en kg/d, para: Cianuros (1.42), Bario (66.3), Níquel 294.0), vanadio (49.96), Zinc (253.0), fluoruros 510.0), Boro (553.5). En ton/día para: litio (4.5), fierro (1.77), cloruros (127.76) y sulfatos (689.69). Los contaminantes que rebasaron la capacidad de asimilación en la presa Manuel Ávila Camacho en toneladas/d, fueron: la DQO (- 91.7), los SST (- 47.2), la DBO<sub>5</sub> (-2.1), el Nitrógeno Total (-21.0), el N-NH<sub>3</sub> (- 11.29), los sulfuros (-6.0), las grasas y aceites (-5.19) y el fósforo total (-3.19). En kg/día: los detergentes (-814.3), los nitritos (- 85.6), el manganeso (-26.0), selenio (-7.6) y el Bis 2- (2-Etilhexil) Ftalato (-5.1). Los mayores porcentajes de reducción de la carga superficial requeridos para mejorar la calidad del embalse, de acuerdo a sus Límites Máximos de Descarga para alcanzar las metas deseadas fueron: el fósforo total 99.6%, el N-NH<sub>3</sub> 99%, los sulfuros 97.5%, el Nitrógeno Total 95.5 %, la DQO 75.4%, SAAM 67.3%, la DBO<sub>5</sub> 63.3%, los Nitritos 61.5%; el Bis-(2-Etilhexil) Ftalato 48.2%, el selenio 50%; el Nonilfenol 44.4%, los SST 43.5% y las grasas y aceites 42.2%. Por su peligrosidad, desde el punto de vista de su toxicidad, es necesario poner especial atención en el abatimiento de las concentraciones del N-NH<sub>3</sub>, los sulfuros, los detergentes, los nitritos, el Nonilfenol y el Bis-2-(Etilhexil) Ftalato.

Bajo el contexto del cambio climático, el modelo adaptado a las condiciones del sistema determinó que sería necesaria una disminución crítica del volumen del almacenamiento

en el embalse en un 48% como ocurrió en la década de los ochenta, para que la DQO se elevara hasta un 71%, al pasar de 40.6 a 69.6 mg/l en la columna de agua. Esta alza en la concentración propiciaría que la calidad del agua estuviera permanentemente contaminada. En este escenario las concentraciones de los contaminantes evaluados incrementaría 80.2% en promedio. Asimismo, se determinó que los cambios en el almacenamiento por la disminución del escurrimiento entre el 6 y el 7.5%, correspondientes a una disminución del almacenamiento de 17.8 y 22.2 Mm<sup>3</sup>/año para los escenarios A1B y A2, resultarían en incrementos de la concentración de los contaminantes en 4.3 y 5.4%, respectivamente.

El nivel de almacenamiento que está relacionado a las extracciones y las aportaciones de agua, influye directamente en el comportamiento de la calidad del agua de la presa. De acuerdo con las predicciones obtenidas, se recomendó que en el estiaje no baje el nivel de almacenamiento a un nivel inferior a los 216 Mm<sup>3</sup>, propiciando al menos mantener las concentraciones promedio de los parámetros determinados en este estudio. Se concluyó que en general son más importantes los procesos internos de transformación o reducción de la concentración de las sustancias en la columna de agua que la disminución de la concentración por la extracción de contaminantes que se lleva a cabo a través del agua enviada al Distrito de Riego 030 Valsequillo por la obra de toma. Esta aseveración es consecuencia del tiempo de residencia hidráulico en la presa que es de 302 días en promedio, lo que propicia altas tasas de decaimiento de algunos contaminantes como la DBO<sub>5</sub> (166.5 m/año), los detergentes (122.5 m/año), la DQO (66 m/año) y algunos compuestos orgánicos como el Nonilfenol (120.8 m/año). No obstante lo anterior, la extracción de agua en profundidad tiene un efecto muy positivo por lo que debe programarse y mantenerse cada año. La extracción propicia que la estratificación térmica sea muy inestable como consecuencia de que al extraer agua más fría y densa de la capa inferior del almacenamiento, provoca la mezcla de la columna. Además, se extraen sustancias como materia orgánica, sulfuros y fósforo, contaminantes que se incrementan su concentración en condiciones anóxicas como las que normalmente presenta el agua en la zona profunda. Dado lo anterior se recomendó propiciar una mayor tasa de flujo que pudiera ser sostenida.

Dados los resultados obtenidos en esta investigación y los antecedentes del manejo del lirio acuático se propone realizar una investigación adicional para determinar la factibilidad técnica y económica de utilizar su presencia como un gran sistema de tratamiento biológico, haciéndolo más eficiente a través de la extracción de la biomasa. Es necesario publicar la Declaratoria de Clasificación de la presa Manual Ávila Camacho con el propósito de que la CONAGUA tenga los elementos legales y administrativos para no autorizar nuevas descargas de aguas residuales al embalse lo que es posible cuando se demuestra que no existe capacidad de dilución de la mayoría de contaminantes. Para alcanzar la reducción de contaminantes propuesta para recuperar la calidad del agua de la presa Valsequillo, no sólo debe considerarse la construcción de plantas de tratamiento, se deben investigar otras estrategias para conseguirlo como son la remoción de contaminantes dentro de los procesos que los generan, el cambio de materias primas e implantar programas de investigación y desarrollo tecnológico que permitan la producción limpia. Otras acciones son la tan postergada disminución de los fosfatos en los detergentes; se debe modificar la Norma Oficial Mexicana, NOM-002-SEMARNAT-1996, Que Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales a los Sistemas de Alcantarillado Urbano o Municipal, ajustándola a cada condición o a un amplio espectro de condiciones a fin de asegurar el adecuado funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua residual.

## Índice

	Página
Agradecimientos	xi
Resumen	xii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo General	6
1.2 Objetivos particulares e hipótesis de trabajo	6
<b>2. Antecedentes</b>	<b>8</b>
2.1 Determinación de la capacidad de asimilación de contaminantes convencionales y sustancias tóxicas	8
2.2 Estrategia de modelación de parámetros convencionales y no convencionales	17
2.3 Determinación de la capacidad de asimilación en relación con la eutroficación	28
2.3.1 Correlaciones paramétricas y modelos simplificados	28
2.4 Aplicación de la estrategia de modelación al impacto al cambio climático en embalses	34
<b>3. Descripción del área de estudio</b>	<b>39</b>
3.1 Escurrimientos superficiales y sus aprovechamientos	41
3.2 Morfología de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo)	44
3.3. Clima	46
3.3.1 Precipitación	46
3.3.2 Temperatura	46
3.3.3 Evaporación potencial	47
3.4 Calidad del agua	47
<b>4. Materiales y métodos. Muestreos y análisis</b>	<b>64</b>



4.1 Plan de trabajo	65
4.2 Selección de los sitios de muestreo	65
4.3 Selección de los parámetros de calidad del agua	69
4.4 Recolección de muestras de agua y sus análisis para determinar su calidad	70
4.5 Recolección de muestras de sedimento	85
4.6 Recolección de muestras y análisis de peces	86
4.7 Recolección de plantas acuáticas flotantes	87
4.8 Evaluación de la eutroficación	88
4.9 Hidrodinámica	90
4.10 Monitoreo del comportamiento térmico	94
<b>5. Resultados y discusión</b>	<b>98</b>
5.1 Calidad del Agua a partir de parámetros convencionales de los tributarios y el afluente del embalse	99
5.2 Calidad del agua en el embalse y su interacción con los tributarios	109
5.3 Resultados de los análisis de sedimentos	126
5.4 Resultados de los análisis de peces	129
5.5 Resultados de los análisis de plantas acuáticas	130
5.6 Hidrodinámica y comportamiento térmico del agua embalsada	134
5.7 Metodología para la determinación de la capacidad de asimilación de contaminantes de la presa Manuel Ávila Camacho (Valsequillo)	153
5.7.1 Parámetros convencionales y no convencionales	153
5.7.2 Determinación de la capacidad de asimilación a través de la evaluación del nivel trófico del sistema	171

5.7.3 Especies fitoplanctónicas como indicadoras del estado trófico del embalse	180
5.7.4 Impacto del cambio climático	181
<b>6. Conclusiones</b>	<b>202</b>
<b>7. Recomendaciones para el manejo de la presa Valsequillo</b>	<b>210</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>214</b>
Anexos	237

## Índice de Tablas

Tabla No.		Página
1	Valores establecidos para la clasificación trófica de lagos y embalses templados	29
2	Escurrimiento indirecto y base en millones de m <sup>3</sup>	43
3	Dimensiones sub-superficiales de la presa Manuel Ávila Camacho	45
4	Sistemas de tratamiento en operación (2004).en la cuenca alta del río Atoyac	52
5	Indicadores de calidad del agua	53
6	Parámetros, carga aportada y porcentajes de reducción en las desembocaduras de los ríos Atoyac y Alseseca	63
7	Ubicación geográfica de los sitios de monitoreo	69
8	Actividades o parámetros de calidad del agua analizados en la presa Manuel Ávila Camacho, ríos Atoyac, Alseseca y efluente del embalse. LDM: Límite de Detección. LPC: Límite Práctico de Cuantificación	71
9	Parámetros de calidad del agua medidos en campo con equipo multiparamétrico	83
10	Información mínima requerida para el empleo del modelo matemático de eutroficación de lagos cálidos	89
11	Especificaciones técnicas de los sensores del CTD Sea bird 19 plus	91
12	Posición de los perfiles del correntómetro en la campaña de diciembre de 2010 (a) y julio de 2011(b)	93
13	Especificaciones técnicas de la estación meteorológica Davis, modelo Vantage Pro2	94
14	Ubicación de la estación automática de medición de calidad del agua en la presa Manuel Ávila Camacho	94
15	Sensores de la boya ubicada en la presa Manuel Ávila Camacho. Medición de parámetros superficiales	95
16	Sensores de la boya ubicada en la presa Manuel Ávila Camacho, medición de Parámetros a 15 metros de profundidad	95
17	Especificaciones de medición de termistores	97

18	Calidad del agua de los ríos Atoyac y Alseseca, así como del efluente de la presa Valsequillo (P. V), calificado a partir de indicadores básicos o convencionales	100
19	Calidad del agua de la presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo a partir de indicadores básicos o convencionales	111
20	Criterios de evaluación de toxicidad aguda de muestras líquidas, empleando a <i>Vibrio fischeri</i> y <i>Daphnia magna</i> como organismo de prueba	120
21	Frecuencia de aparición de compuestos orgánicos en la presa Manuel Ávila Camacho en superficie y fondo, su efluente y los ríos Atoyac y Alseseca	122
22	Concentraciones de compuestos orgánicos con más frecuencia de aparición en la presa Manuel Ávila Camacho y su comparación para los usos del agua como Fuente de Abastecimiento de Agua Potable* (FAAP) y Protección de la Vida Acuática* (PVA)	123
23	Concentraciones de compuestos orgánicos en el río Alseseca y su comparación con los usos del agua como Fuente de Abastecimiento (FAAP) y Protección de la Vida Acuática (PVA)	124
24	Concentraciones de compuestos orgánicos en el río Atoyac y su comparación con los usos del agua como Fuente de Abastecimiento de Agua Potable* (FAAP) y Protección de la Vida Acuática* (PVA)	125
25	Concentraciones de compuestos orgánicos detectados en el efluente de la presa Manuel Ávila Camacho y su comparación con los usos del agua como Fuente de Abastecimiento de Agua Potable* (FAAP) y Protección de la Vida Acuática* (PVA)	126
26	Metales pesados, nutrientes, materia orgánica y compuestos orgánicos determinados en sedimentos de la presa Manuel Ávila Camacho	127
27	Concentraciones de compuestos orgánicos detectados en muestras de peces procedentes de la presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo	130
28	Metales pesados cuantificados en plantas completas de <i>Eichhornia crassipes</i> de la Presa Valsequillo, Pue.	130
29	Concentraciones de Bis-2 (Etilhexil) Ftalato en cuerpos de agua de México	132
30	Características del Bis 2-(Etilhexil) Ftalato	133
31	Capacidad de asimilación de la presa Manuel Ávila Camacho para 10 parámetros de calidad del agua, columnas (13) y (14)	159

32	Capacidad de asimilación de la presa Manuel Ávila Camacho para 15 parámetros de calidad del agua, columnas (13) y (14)	162
33	Metas de calidad del agua empleadas para la determinación de la capacidad de asimilación	165
34	Ecuaciones lineales de las curvas carga-respuesta para 25 parámetros de calidad del agua evaluados en la presa Manuel Ávila Camacho	167
35	Comparativo de cargas actuales y reducción de contaminantes	168
36	VARIABLES EMPLEADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EUTROFICACIÓN DE LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO CON EL MODELO DE LAGOS CÁLDIDOS DEL CEPIS CON LA CARGA SUPERFICIAL ACTUAL (2010-2011)	173
37	VARIABLES EMPLEADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EUTROFICACIÓN DE LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO CON EL MODELO DE LAGOS CÁLDIDOS DEL CEPIS CON LA CARGA SUPERFICIAL HISTÓRICA (1983-2009)	175
38	Valores establecidos para la clasificación trófica de lagos y embalses templados	179
39	Listado de especies identificadas en la presa Valsequillo en el Estado de Puebla	180

### Índice de Figuras

Figura No.		Página
1	Representación de un modelo conceptual de cómo está definida la relación entre la respuesta de la calidad del agua a la Carga Total Máxima de contaminantes (CTM). Fuente: modificada de Depinto <i>et al.</i> , (2004).	12
2	Relación de la carga de contaminantes y la calidad del agua. Fuente: modificada de Depinto <i>et al.</i> , (2004).	13
3	Representación hipotética de la capacidad de asimilación de un sistema acuático prístino o sin contaminación. Fuente: modificada de Landis (2008).	15
4	Representación hipotética de la capacidad de asimilación de un sistema acuático con alta influencia antropogénica. Fuente: modificada de Landis (2008)	16
5	Representación de las variables implicadas en un balance de masa en un cuerpo de agua. Fuente: Thomann y Salas (1994)	23

6	Nomenclatura del modelo de un cuerpo de agua totalmente mezclado. Thomann y Salas (1994)	24
7	Relación de $L(p) / Z$ vs $T_w$ de datos observados de América Latina y categorías tróficas definidas cualitativamente. Fuente: Salas y Martino (1990)	32
8	Distribución de probabilidad de nivel trófico de lagos cálidos tropicales basado en el fósforo total Fuente: Salas y Martino (1990)	33
9	Cuenca Alta del río Balsas. Ubicación de la presa Valsequillo	40
10	Longitud y ancho máximo de la presa Manuel Ávila Camacho, Pue.	44
11	Climograma en la estación Balcón del Diablo (1944-2011)	47
12	Aportaciones a la presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo y su relación con el almacenamiento del periodo de 1983 al 2011	49
13	Precipitación media mensual de la estación meteorológica Balcón del Diablo, Puebla del periodo de 1944 al 2011	50
14	Ubicación de los sitios de monitoreo de CONAGUA en la presa Valsequillo	54
15	Tendencia de la Demanda Bioquímica de Oxígeno de 5 días en los ríos Atoyac y Alseseca	55
16	Demanda Química de Oxígeno en los ríos Atoyac y Alseseca	56
17	Sólidos suspendidos en el río Atoyac y Alseseca antes de entrar a la presa Valsequillo	57
18	Evolución de la $DBO_5$ en la en la zona de la cortina de la presa Valsequillo (Obra de toma)	58
19	Evolución de la DQO en la en la zona de la cortina de la presa Valsequillo (Obra de toma)	58
20	Evolución de los sólidos suspendidos totales en la en la zona de la cortina de la presa Valsequillo (Obra de toma)	59
21	Evolución de la $NH_3-NH_4^{4+}$ en la entrada de la presa Valsequillo (río Atoyac, Derivadora Echeverría)	60
22	Tendencia de la conductividad específica en la entrada de la presa Valsequillo (Derivadora Echeverría)	61

23	Ubicación de los sitios de muestreo en la presa Manuel Ávila Camacho	68
24	Localización de perfiles obtenidos con CTD durante el 2010	91
25	Localización de perfiles obtenidos con CTD durante el 2011	92
26	Perfilador de corrientes	92
27	Boya instalada en la presa Manuel Ávila Camacho, se observan paneles solares y señalización	96
28	Boya instalada en la presa Manuel Ávila Camacho, se observan los medidores multiparámetros	96
29	Concentración de la DBO <sub>5</sub> en los tributarios y el embalse Valsequillo y su efluente (salida).	115
30	Concentración de la DQO en los tributarios y el embalse y su efluente (salida)	116
31	Relación DBO <sub>5</sub> /DQO de los ríos Atoyac, Alseseca, la presa Manuel Ávila Camacho y su efluente	117
32	Infestación del lirio acuático <i>Eichhornia crassipes</i> en la presa Manuel Ávila Camacho, Pue. (2010-2011)	118
33	Concentración de la NH <sub>3</sub> -NH <sub>4</sub> en los tributarios y el embalse y su efluente (salida)	119
34	Unidades tóxicas determinadas en la presa Valsequillo, sus tributarios y efluente (salida o extracción)	120
35	Comportamiento del almacenamiento promedio mensual de la presa Manuel Ávila Camacho del periodo 1983 al 2011	136
36	Velocidad y dirección de las corrientes a distintas profundidades de la presa Manuel Ávila Camacho (Diciembre de 2010)	137
37	Velocidad del viento en la presa Manuel Ávila Camacho, noviembre-diciembre del 2010	138
38	Temperatura diaria en la zona de la cortina de la presa Manuel Ávila Camacho (Diciembre, 2010)	139
39	Temperatura diaria en la zona de la Panga en la presa Manuel Ávila Camacho (Diciembre, 2010)	140
40	Perfiles de temperatura, conductividad y densidad en la cortina	141

41	Distribución de velocidad y dirección de la corriente en los sitios Centro (izquierda) y Cortina (derecha). Junio de 2011	142
42	Perfiles de temperatura, conductividad y densidad en la cortina en mayo-junio 2011	143
43	Perfiles térmicos de la presa Manuel Ávila Camacho de agosto de 2013 a mayo de 2014	144
44	Gradientes de temperatura en la presa Manuel Ávila Camacho (agosto 2013-julio 2014)	144
45	Perfil de temperatura en área cubierta con tapetes de <i>Eichhornia crassipes</i> en junio de 2011	146
46	Tipos de cuerpos de agua por los procesos de mezcla y su relación con la profundidad y latitud ajustada por profundidad (Lewis, 1973)	147
47	Condiciones ambientales del río Atoyac y su problemática. Fuente: Modificado: Karr, <i>et al.</i> , (1986)	149
48	Condiciones ambientales la presa Manuel Ávila Camacho. Fuente: Modificado: Karr, <i>et al.</i> , (1986)	151
48-Bis	Carga actual ( $WT_a$ , $g/m^2$ -año), (b) Pérdida neta de los contaminantes ( $V_T$ , $m/año$ ), (c) Límites Máximos de Descarga (LMD, $g/m^2$ -año) y (d) Porcentajes de reducción para alcanzar la primera meta objetivo para 10 parámetros de calidad del agua en la presa Manuel Ávila Camacho	160
49	Carga actual ( $WT_a$ , $g/m^2$ -año), (b) Pérdida neta de los contaminantes ( $V_T$ , $m/año$ ), (c) Límites Máximos de Descarga (LMD, $g/m^2$ -año) y (d) Porcentajes de carga disponible o de reducción para alcanzar la meta objetivo para 15 parámetros de calidad del agua en la presa Manuel Ávila Camacho	163
50	Curva carga - respuesta de la DQO para la presa Manuel Ávila Camacho	166
51	Temperaturas medias anuales del agua y el ambiente en la presa Manuel Ávila Camacho, Pue (1975-1999)	172
52	Estimación de la clasificación trófica de la presa Manuel Ávila Camacho, Pue., utilizando la carga superficial $L(p)$ y la profundidad media $z$ en función del tiempo de retención hidráulico ( $T_w$ ), para los datos actuales e históricos. Salas y Limón (1986)	178
53	Variación de la concentración de DQO para escenarios de sequía y abundancia de agua en la presa Manuel Ávila Camacho, así como para los escenarios A1B y A2	190



54	Variación de la concentración del nitrógeno amoniacal para escenarios de sequía y abundancia de agua en la presa Manuel Ávila Camacho, así como para los escenarios A1B y A2	191
55	Variación de la concentración del Bis-(2-Etilhexil) Ftalato para escenarios de sequía y abundancia de agua en la presa Manuel Ávila Camacho, así como para los escenarios A1B y A2	192
56	Probabilidad esperada de la concentración de DQO en la presa Valsequillo, ríos Atoyac y Alseseca	194
57	Probabilidad esperada de la concentración de $\text{NH}_3\text{-NH}_4^+$ en la presa Valsequillo, ríos Atoyac y Alseseca	195
58	Probabilidad esperada de la concentración de ortofosfatos en la presa Valsequillo, ríos Atoyac y Alseseca	195
59	Probabilidad esperada de la concentración de oxígeno disuelto en la presa Valsequillo, ríos Atoyac y Alseseca	196

## Índice de Anexos

### Anexo N°

- 1 Principales parámetros de calidad del agua medidos y su significado ambiental. Fuente: Elaboración propia a partir de Nisbet y Verneaux, 1970; Mc Neely *et al.*, 1979; Merian 1991; Harte *et al.*, 1995; Jiménez, 2001; CONAGUA, 2011.
- 2 Parámetros medidos y métodos analíticos utilizados para sedimentos de la presa Manuel Ávila Camacho, Puebla.
- 3 Parámetros medidos y métodos analíticos utilizados para tejidos de peces.
- 4 Metales, metaloides y BPC medidos en tejidos del lirio acuático y los métodos analíticos utilizados.
- 5 Resultados y estadísticas de parámetros, físicos, químicos y biológicos obtenidos en seis muestreos realizados en los ríos Atoyac y Alseseca (Antes de la Confluencia con la Presa Valsequillo, A.C.P), así como en el efluente de la presa, denominado como aguas abajo de la presa Valsequillo (a. a. P.).
- 6 Valores promedio y su desviación estándar, coeficiente de variación, la mediana e intervalo de los parámetros de calidad del agua medidos en la presa Manuel Ávila Camacho.
- 6.1 Calidad del agua de los ríos Atoyac y Alseseca, así como en el efluente de la presa Valsequillo (P.V) determinada a partir de indicadores básicos o convencionales.
- 6.2 Calidad del agua de la presa Manuel Ávila Camacho, Valsequillo a partir de indicadores básicos o convencionales.
- 7 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89.

**DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ASIMILACIÓN DE  
CONTAMINANTES EN LA PRESA MANUEL ÁVILA CAMACHO, PUEBLA**

**M. EN C. ERIC DANIEL GUTIÉRREZ LÓPEZ**